

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

TRABAJO FIN DE GRADO

Redes de alimentación en tecnología gap waveguide con capacidad de reconfiguración mediante tornillos de sintonía

Jorge Campos Bel

Tutor: José Luis Masa Campos

JUNIO 2019

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

TRABAJO FIN DE GRADO

Redes de alimentación en tecnología gap waveguide con capacidad de reconfiguración mediante tornillos de sintonía

AUTOR: Jorge Campos Bel

TUTOR: José Luis Masa Campos



Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)
Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones (TEC)
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Junio de 2019

Resumen (en castellano)

En los últimos años, se ha observado un gran avance en las tecnologías relacionadas con el ámbito de las telecomunicaciones, y significativamente en el ámbito de las radiofrecuencias. Se espera que en los próximos años con la introducción de la tecnología inalámbrica 5G suponga un aumento exponencial de las conexiones inalámbricas y a su vez un aumento en el número de satélites y en sus conexiones entre ellos, haciendo que todos los estados de mejora de rendimiento de los sistemas de radio frecuencias sean necesarios y críticos. Esto requiere una constante mejora en las bandas de frecuencia de trabajo de las distintas aplicaciones, y por ello se han ido incrementando las frecuencias centrales de diseño.

Dado que en una gran parte de los sistemas de radiofrecuencia se emplean diseños multicapa, y para ello es necesario asegurar un correcto contacto entre estas y debido a que, a altas frecuencias, asegurar dichos contactos se vuelve inviable, se ha procedido a desarrollar la tecnología gap waveguide, la cual no requiere de contactos físicos entre placas para lograr una correcta comunicación.

Por ello, este trabajo de fin de grado consiste en el estudio de la tecnología Gap Waveguide junto con el uso de tornillos de sintonía en la guía, con el objetivo de crear nuevos sistemas de guía de onda. El uso de tornillos nos permite configurar una red con desfases, sin que se vea afectada significativamente la amplitud, mientras que la tecnología Gap Waveguide nos soluciona el problema con el contacto físico entre capas.

A lo largo del estudio, se ha trabajado con distintas configuraciones de pines para una guía sola, para un divisor de potencia en forma T, para un divisor de potencia con codo incluido, y finalmente para un sistema de alimentación de 4 puertas. A su vez, se ha configurado una antena de bocina tanto en tecnología de guía de onda clásica, como con gap waveguide, de manera que servirá como elemento unitario de un array de 4 elementos. La frecuencia de diseño central será 17 GHz, presentándose a lo largo del estudio lo sucedido en un espectro comprendido entre 16 y 18 GHz

Abstract(English)

In recent years, a great advance has been observed in technologies related to the field of telecommunications, and significantly in the field of radio frequencies. It is expected that in the coming years with the introduction of 5G wireless technology will lead to an exponential increase in wireless connections and in turn an increase in the number of satellites and their connections between them, making all states of performance improvement of radio frequency systems necessary and critical. This requires a constant improvement in the working frequency bands of the different applications, and for this reason the design central frequencies have been increasing.

Given that in a great part of the radiofrequency systems multi-layer designs are used, and for it it is necessary to assure a correct contact between these and due to the fact that, at high frequencies, to assure these contacts becomes unfeasible, the waveguide gap technology has been developed, which does not require physical contacts between plates to achieve a correct communication.

Therefore, this end-of-grade work consists of the study of Gap Waveguide technology together with the use of tuning screws in the guide, with the aim of creating new waveguide

systems. The use of screws allows us to configure a network with delays, without significantly affecting the amplitude, while Gap Waveguide technology solves the problem with physical contact between layers.

Throughout the study, we have worked with different configurations of pins for a single guide, for a T-shaped power divider, for a power divider with elbow included, and finally for a 4-door power supply system. At the same time, a horn antenna has been configured both in classic waveguide technology and with gap waveguide, so that it will serve as a unitary element of a 4 element array. The central design frequency will be 17 GHz, presenting throughout the study what happened in a spectrum between 16 and 18 GHz

Palabras clave (castellano)

Red de alimentación corporativa, red paralelo , guía de onda rectangular, gap waveguide, groove gap waveguide, polarización circular, guía de onda, plano H, elemento radiante, parámetros S, adaptación, reflexión, array lineal, tornillo, diagrama de radiación

Agradecimientos

Si estás leyendo esto, y quieres el cuerpo de Cristiano Ronaldo ingresa 100 euros a 123-456-345-768. Si haces la oferta ahora, por el módico precio de 200 euros, te llegará también la mente de Gauss y si crees en las hadas...

Que es broma. Pues nada, creo que es momento de ponerme sentimentaloides y agradecer a quien toca agradecer.

Primero a mi familia: A mis padres que me han apoyado y me han hecho de cojín emocional, apoyándome y recomendándome, aunque en muchas ocasiones no les haya hecho caso. Supongo que es implica vivir, y pasear hacia el camino de la adultez.

Segundo agradeceré a mi tutor José Luis Masa Campos, por haberme ofrecido este TFG y por su apoyo y paciencia. También agradeceré a Edu, por todas sus ayudas incondicionales.

No me puedo olvidar de los amigos. Hay quien dice que lo más valioso que se obtiene de la universidad no es el conocimiento, si no las amistades. Tendría que mencionar aquí a mucha gente, y la impresión es carilla, así que Amigos: **Os quiero!**

Y bueno, finalmente agradeceré a los Beatles y Elliott Smith. Todos los días en el laboratorio oyéndolos me ha ayudado en el idilio de la soledad.

INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organización de la memoria	1
2	Estado del arte	3
2.1	Principios básicos de antenas	3
2.1.1	Definición de Antena y bandas de Trabajo	3
2.1.2	Conceptos Básicos	3
2.1.2.1	Parámetros de dispersion	3
2.1.2.2	Diagrama de Radiación	4
2.1.2.3	Directividad	5
2.1.3	Concepto de array de antena	5
2.1.3.1	Array Lineales	6
2.1.4	Bocinas	6
2.1.4.1	Bocinas sectoriales de plano H	7
2.2	Tecnología GAP	7
2.2.1	MetaMateriales	7
2.2.2	Teoría de la GAP	8
2.2.2.1	Groove Gap Waveguide	8
3	Diseño de Estructura	9
3.1	Especificaciones y características de la guía	9
3.2	Tornillos de ajuste de fase	9
3.3	Divisor de cuatro puertas en tecnología convencional	10
3.4	Divisores en T	10
3.4.1	Divisor en T de Salida	10
3.4.1.1	Divisor en T de Salida con tornillos de ajuste de fase	12

3.4.1.2 Divisor de Salida con tornillos alrededor de la hilera de pines cercana a la entrada.....	14
3.4.2 Divisor en T de salida.....	14
3.4.2.1 Divisor T de salida con dos pares de tornillos	15
3.4.3 Resumen indicativo del ajuste de tornillos	17
3.5 Codo.....	17
3.6 Divisor con codo	18
3.6.1 Divisor de salida	19
3.6.1.1 Divisor de salida con dos tornillos.....	20
3.6.2 Divisor de entrada.....	20
3.6.2.1 Divisor de entrada con dos tornillos	21
3.7 Divisor de cuatro puertas	22
3.7.1.1 Divisor de cuatro puertas con pines de ajuste de fase.....	24
3.8 Conclusión	25
4 Desarrollo.....	26
4.1 Elemento unitario.....	26
4.1.1 Bocina Normal.....	26
4.1.2 Bocina GAP	27
4.1.3 Comparación entre Bocinas.....	28
4.2 Factor de Array	29
4.3 Array de alimentación + Elementos Unitarios.....	30
4.3.1 Bocinas Clásicas	30
4.3.2 Bocinas GAP	31
4.4 Soluciones para el problema de los Grating Lobes.....	32
4.4.1 Lente de dieléctrico	32
4.4.2 Array apilado en Y	33
5 Conclusiones y trabajo futuro	35
5.1 Conclusiones	35
5.2 Trabajo futuro	35
Referencias.....	37
Glosario.....	39
Anexos	I
A Guía de Onda GAP.....	I2.
Guía de onda a 2 hileras de pines 437.....	V
B: Divisores	XIII
3. Divisor T de salida.....	XIII

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ONDAS INCIDENTES Y REFLEJADAS EN UN DISPOSITIVO DE N PUERTAS	4
FIGURA 2. 2 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE COORDENADAS CILINDRICA	5
FIGURA 2. 3 ARRAY LINEAL DE N ELEMENTOS	6
FIGURA 2.4 PARÁMETROS Y GEOMETRÍA DE UNA BOCINA	7
FIGURA 3.0 GUIA CON PAR DE TORNILLOS DE AJUSTE DE FASE.....	9
FIGURA 3.1 DIVISOR DE CUATRO PUERTAS ORIGINAL	10
FIGURA 3.2 EJEMPLO DE DISEÑO DE PINES PERIÓDICOS	10
FIGURA 3.3 DIVISOR DE POTENCIAS T	11
FIGURA 3.4 PARÁMETROS EMPLEADOS PARA EL DISEÑO DE LA T	11
FIGURA 3.5 ADAPTACIÓN DEL DIVISOR EN T.....	12
FIGURA 3.6 PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN EN AMPLITUD Y FASE DEL DIVISOR EN T.....	12
FIGURA 3.7 DIVISOR DE POTENCIAS T CON DOS TORNILLOS.....	13
FIGURA 3.8 ADAPTACIÓN EN AMPLITUD Y CARTA DE SCHMITT DEL DIVISOR T CON TORNILLOS...	13
FIGURA 3.9 PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN EN AMPLITUD Y FASE DEL DIVISOR EN T.....	13
FIGURA 3.10 DIVISOR T CON TORNILLOS EN LA PARTE INFERIOR DE LA GUÍA	14
FIGURA 3.11 ADAPTACIÓN CON DOS TORNILLOS EN Z POSITIVAS.....	14
FIGURA 3.12 TRANSMISIÓN POR TORNILLOS EN Z POSITIVAS	15
FIGURA 3.13 PARÁMETRO S11 DIVISOR ALARGADO	15
FIGURA 3.14 PARÁMETRO S21 Y S31 DIVISOR ALARGADO	16
FIGURA 3.15 DIVISOR T CON DOS PARES DE TORNILLOS	16
FIGURA 3.16 ADAPTACIÓN TRAS PARES DE TORNILLOS	17
FIGURA 3.17 TRANSMISIÓN TRAS DOS PARES DE TORNILLOS.....	17
FIGURA 3.18 DIVISOR T CON 4 TORNILLOS ARRIBA CONTRAMAPEADOS.....	18

FIGURA 3.19 POSICIÓN DE LOS TORNILLOS EN DIVISOR T	18
FIGURA 3.20 DESFASES Y ANCHO DE BANDA.....	18
FIGURA 3.21 DISEÑO DEL CODO.....	19
FIGURA 3.22 ADAPTACIÓN EN AMPLITUD Y EN CARTA DE SCHMITT DEL CODO	19
FIGURA 3.23 TRANSMISIÓN EN AMPLITUD DEL CODO	19
FIGURA 3.24 DIVISOR CON CODO.....	20
FIGURA 3.25 PARÁMETRO S11 DIVISOR DE DOS PUERTAS CON CODO	20
FIGURA 3.26 TRANSMISIÓN DEL DIVISOR DE DOS PUERTAS CON CODO	20
FIGURA 3.27 DIVISOR DE DOS PUERTAS CON CODO Y TORNILLOS	21
FIGURA 3.28 ADAPTACIÓN TRAS TORNILLOS	21
FIGURA 3.29 TRANSMISIÓN DE DIVISOR CON CODO TRAS DOS TORNILLOS.....	21
FIGURA 3.30 DIVISOR ALARGADO CON CODO	22
FIGURA 3.31 ADAPTACIÓN DEL DIVISOR ALARGADO CON CODO.....	22
FIGURA 3.32 TRANSMISIÓN DEL DIVISOR ALARGADO CON CODO.....	22
FIGURA 3.33 DIVISOR ALARGADO CON CODO	2;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 3.34 ADAPTACIÓN DEL DIVISOR ALARGADO CON CODO2;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 3.35 TRANSMISIÓN DEL DIVISOR ALARGADO CON CODO 2;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 3.36 DIVISOR DE CUATRO SALIDAS	24
FIGURA 3.37 ADAPTACIÓN DEL DIVISOR DE CUATRO PUERTAS	24
FIGURA 3.38 TRANSMISIÓN DEL DIVISOR DE CUATRO PUERTAS	24
FIGURA 3.39 DIVISOR DE CUATRO PUERTAS CON TORNILLOS DE AJUSTE DE FASE QUE PROPORCIONAN FASE PROGRESIVA DE 80 GRADOS	25
FIGURA 3.40 ADAPTACIÓN DEL DIVISOR DE CUATRO PUERTAS CON TORNILLOS DE AJUSTE DE FASE	25
FIGURA 3.41 TRANSMISIÓN DEL DIVISOR DE CUATRO PUERTAS CON TORNILLOS DE AJUSTE DE FASE	25

FIGURA 3.42 DESFASES DEL DIVISOR DE CUATRO PUERTAS SEGÚN CONFIGURACIÓN DE TORNILLOS	26
FIGURA 4.1 DIAGRAMA DE RADIACIÓN TEÓRICO DEL ELEMENTO UNITARIO.....	27
FIGURA 4.2 PARÁMETROS DE UNA BOCINA DE PLANO H TEÓRICO Y EN CST	28
FIGURA 4.3 ADAPTACIÓN DE LA BOCINA CONVENCIONAL	28
FIGURA 4.4 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA BOCINA CONVENCIONAL	28
FIGURA 4.5 BOCINA GAP	29
FIGURA 4.6 ADAPTACIÓN DE LA BOCINA GAP.....	29
FIGURA 4.7 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA BOCINA GAP.....	29
FIGURA 4.8 COMPARATIVA DE LA ADAPTACIÓN ENTRE BOCINA GAP Y CONVENCIONAL ...	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.0
FIGURA 4.9 COMPARATIVA ENTRE DIRECTIVIDAD Y GANANCIA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.0
FIGURA 4.10: DIAGRAMA DE RADIACIÓN TOTAL TEÓRICO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.0
FIGURA 4.11 ARRAY DE CUATRO BOCINAS CONVENCIONALES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.1
FIGURA 4.12 ARRAY DE CUATRO BOCINAS GAP	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.1
FIGURA 4.13 ARRAY DE CUATRO BOCINAS CONVENCIONALES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.1
FIGURA 4.14 ADAPTACIÓN DEL ARRAY DE BOCINAS CONVENCIONALES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.2
FIGURA 4.15 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE ARRAY DE BOCINAS CONVENCIONALES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.2
FIGURA 4.16 ARRAY DE BOCINAS GAP.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.2
FIGURA 4.17 ADAPTACIÓN ARRAY DE BOCINAS GAP	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.3
FIGURA 4.18 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DEL ARRAY DE BOCINAS GAP	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.3
FIGURA 4.19 BOCINA CON LENTE Y ADAPTACIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.3
FIGURA 4.20 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA BOCINA CON LA LENTE DE DIELECTRICO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.4

FIGURA 4.21: COMPARATIVA ENTRE BOCINA CON Y SIN DIELECTRICO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.4
FIGURA 4.22 FACTOR DE ARRAY DE BOCINA CON LENTE	..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.4
FIGURA 4.23 ARRAY DE BOCINAS APILADO EN Y	..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.5
FIGURA 4.24 DIAGRAMA DE RADIACIÓN DEL ARRAY APILADO EN Y	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.5
FIGURA A.1 GUÍA RECTANGULAR DE HILERA DE 3 PINES	..... I
FIGURA A.2 ADAPTACIÓN EN AMPLITUD Y CARTA DE SCHMITT	..... II
FIGURA A.3 TRANSMISIÓN EN AMPLITUD Y FASE	..... II
FIGURA A.4 GUÍA RECTANGULAR CON TORNILLOS	..... III
FIGURA A.5 VARIACIÓN DE LA TRANSMISIÓN EN AMPLITUD (IZQ) Y FASE (DER) TRAS VARIACIÓN DE SEPARACIÓN ENTRE TORNILLOS	..... III
FIGURA A.6 VARIACIÓN DE LA ADAPTACIÓN EN AMPLITUD (IZQ) Y CARTA DE SCHMITT (DER) TRAS VARIACIÓN DE DISTANCIA A LA PARED DE PINES	..... IV
FIGURA A.7 VARIACIÓN DE LA TRANSMISIÓN EN AMPLITUD (IZQ) Y FASE (DER) TRAS VARIACIÓN DE DISTANCIA A LA PARED DE PINES	..... IV
Figura A.8 Adaptación de la guía de 2 hileras en amplitud (izq)y carta de Schmitt (der)	..... V
Figura A.9 Guía Rectangular de hilera de 2 pines 437	..... VI
FIGURA A.10 TRANSMISIÓN DE LA GUÍA DE 2 HILERAS EN AMPLITUD Y FASE	..... VI
FIGURA A.11 GUÍA RECTANGULAR CON TORNILLOS	..... VII
FIGURA A.12 VARIACIÓN DE LA TRANSMISIÓN EN AMPLITUD (IZQ) Y FASE (DER) TRAS VARIACIÓN DE SEPARACIÓN ENTRE TORNILLOS	..... VII
FIGURA A.13 VARIACIÓN DE LA ADAPTACIÓN EN AMPLITUD Y CARTA DE SCHMITT (DER) TRAS VARIACIÓN DE DISTANCIA A LA PARED DE PINES	..... IX
FIGURA A.14 VARIACIÓN DE LA ADAPTACIÓN EN AMPLITUD (IZQ) Y CARTA DE SCHMITT (DER) TRAS VARIACIÓN DE DISTANCIA A LA PARED DE PINES	..... IX
FIGURA B.1 DIVISOR EN T DE SALIDA CON DOS TORNILLOS	..... XIII
FIGURA B.2 VARIACIÓN DE LA ADAPTACIÓN POR EL DESPLAZAMIENTO DE LOS TORNILLOS	..... XIV
FIGURA B.3 VARIACIÓN DEL PARÁMETRO S21 POR EL DESPLAZAMIENTO DE LOS TORNILLOS	....XIV
Figura B.4 Variación del parámetro S31 por el desplazamiento de los tornillos	.....XIV

Figura B.5 Divisor T con tornillos en la parte inferior de la guía.....	XV
Figura B.6 Adaptación con dos tornillos abajo, variando el desplazamiento en x.....	XVI
FIGURA B.7 VARIACIÓN DEL PARÁMETRO S31 POR EL DESPLAZAMIENTO DE LOS TORNILLOS....	XVI
Figura B.8 Divisor T con dos pares de tornillos.....	XVII
FIGURA B.9 VARIACIÓN DE LA ADAPTACIÓN TRAS VARIAR DISTANCIA ENTRE TORNILLOS.....	XVII
FIGURA B.10 VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS S21 TRAS VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE TORNILLOS	XVIII
FIGURA B.11 PARÁMETROS S31 TRAS SEPARACIÓN DE PARES DE TORNILLOS	XVIII
FIGURA B.12 DIVISOR T CON 4 TORNILLOS ARRIBA CONTRAMAPEADOS	XVIII
FIGURA B.13 VARIACIÓN DE LA ADAPTACIÓN VARIANDO A SEPARACIÓN ENTRE TORNILLOS	XIX
FIGURA B.14 VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS S21 VARIANDO SEPARACIÓN ENTRE TORNILLOS	XIX
FIGURA B.15 VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS S21 VARIANDO SEPARACIÓN ENTRE TORNILLOS..	XX
FIGURA B.16 VARIACIÓN DE LA ADAPTACIÓN VARIANDO EL BLOQUE DE TORNILLOS	XX
FIGURA B.17 VARIACIÓN DEL PARÁMETRO S21 EN AMPLITUD VARIANDO EL BLOQUE DE TORNILLOS	XXI
FIGURA B.19 VARIACIÓN DEL PARÁMETRO S31 EN AMPLITUD VARIANDO EL BLOQUE DE TORNILLOS	XXI
FIGURA B.18 VARIACIÓN DEL PARÁMETRO S21 EN FASE VARIANDO EL BLOQUE DE TORNILLOS	XXI
FIGURA B.20 VARIACIÓN DEL PARÁMETRO S31 EN FASE VARIANDO EL BLOQUE DE TORNILLOS	XXII
FIGURA B.21 DIVISOR DE DOS PUERTAS CON CODO Y TORNILLOS	XXII
FIGURA B.22 ADAPTACIÓN TRAS TORNILLOS ABAJO.....	XXIII
Figura B.23 Variación del parámetro S21 tras variación en x del par de tornillos.....	XXIV
Figura B.24 Variación del parámetro S31 tras variación en x del par de tornillos.....	XXIV
Figura B.25 Divisor de cuatro puertas.....	XXV
Figura B.26 Adaptación del divisor de cuatro puertas	XXV

Figura B.27 Trasmisión de Divisor de cuatro puertas	XXVI
---	------

Figura B.28 Divisor de cuatro puertas con dos tornillos en el divisor de salida.....	XXVI
--	------

Figura B.29 Variación del parámetro S31 tras variación en x del par de tornillos.....	XXVII
---	-------

Figura B.30 Adaptación del Divisor de cuatro puertas con dos tornillos en el divisor de salida.....	XXVII
---	-------

Figura B.30 Trasmisión del Divisor de cuatro puertas con dos tornillos en el divisor de salida.....	XXVIII
---	--------

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	2
-----------------	---

Tabla 2.2.....	8
----------------	---

Tabla 3.1	18
-----------------	----

Tabla 3.2.....	26
----------------	----

1 Introducción

1.1 Motivación

En la última década, las telecomunicaciones han desarrollado un avance tecnológico que ha supuesto que se convierta en una de las áreas de desarrollo más punteras. Dentro de las tecnologías de telecomunicaciones, en el área de radiofrecuencias se hacen necesarios avances tecnológicos y nuevos diseños para ofrecer soluciones a las necesidades de mercado actual. Debido a ello, se hace necesario, un continuo avance en las bandas de frecuencias de trabajo que puedan abarcar dichos crecimientos, y una constante búsqueda de aumento de la frecuencia de diseño.

El aumento en las frecuencias de trabajo supone complicaciones en los sistemas de fabricación, puesto que se debe reducir el tamaño de los diseños para su correcto funcionamiento. Dado que gran parte de los sistemas de radiofrecuencia suelen estar diseñados con más de una capa, lograr el contacto electromagnético entre éstas es un requisito indispensable para poder asegurar un correcto funcionamiento del sistema. Sin embargo, cuanto mayor es la frecuencia, más se complica lograr ese contacto, y las técnicas que antes se antojaban eficientes y sencillas, como la unión con tornillos dejan de ser viables.

Asegurar el contacto se volvió una tarea ardua y en ocasiones inviable, ante este problema surgió como respuesta la tecnología gap waveguide (GW)[2][3], que permite la transmisión sin necesidad de un contacto físico entre placas, empleando placas metálicas paralelas rellenas de aire, eliminando las pérdidas de un dieléctrico.

Debido a las distintas necesidades que pueden demandar los usuarios, en muchas ocasiones es necesario una reconfiguración del apuntamiento de la antena. Para ello, se han empleado los tornillos de ajuste de fase, consistiendo en tornillos que atraviesan la guía y que producen desfases en ellas.

1.2 Objetivos

Este trabajo fin de grado tiene dos objetivos:

- Replicar los resultados obtenidos en el Trabajo de Fin de Master de Raquel Villena[1] pero empleando para ello la tecnología Gap en vez de la tecnología convencional. Dicho estudio de ésta tecnología fue implementado en Trabajo de Fin de Master de Irene Villar Gómara[2].
- Implementar un **divisor de potencias** que sirve como red de alimentación para la implementación de un **array de bocinas**, que utilizando el diseño de **tornillos de sintonía** se pudiese aplicar desfases entre las distintas puertas de salida, de manera que en el array final se pudiese obtener un desfase progresivo.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- El capítulo 1 contiene la motivación y objetivos del trabajo de fin de grado
- El capítulo 2 incluye el estado del arte donde se introducen conceptos teóricos sobre Fundamentos de Transmisión y Propagación de Ondas (FTPO), Medios de Transmisión (MTX) y Antenas, Electrónica de Comunicaciones (ELECOM) y Compatibilidad Electromagnética (ACEM).
- El capítulo 3 detalla la evolución de las distintas estructuras en tecnología GAP y el efecto de introducir tornillos de ajuste de fase, hasta desarrollar el divisor de cuatro puertas que servirá como red de alimentación a un array de cuatro elementos.
- El capítulo 4 detalla el desarrollo de los elementos radiantes, más la configuración de arrays que forman. También incluye las redes de alimentación unidas a los elementos radiantes y finalmente algunas soluciones al problema de los grating lobes que aparecen.

2 Estado del arte

2.1 Principios básicos de antenas

2.1.1 Definición de Antena y bandas de Trabajo

Una antena, es según la definición del IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineering), “es un dispositivo generalmente metálico creado con el objetivo de radiar o recibir ondas electromagnéticas”, y que, además, “adapta la salida del transmisor o entrada del receptor al medio”. Las antenas se caracterizan por su conducta en radiación, por su ganancia, directividad, polarización, ganancia, ancho de haz, ancho de banda.

Las antenas se diseñan de forma que trabajen en un cierto ancho de banda de frecuencias específico. Las bandas más comunes son las microondas, que abarcan desde los 300 Mhz hasta los 300 GHz.

Banda	Frecuencia	Longitud De onda(λ)
L	1 – 2 GHz	30 – 15 cm
S	2 – 4 GHz	15 – 7.5 cm
C	4 – 8 GHz	7.5 – 3.75 cm
X	8 – 12.4 GHz	3.75 – 2.42 cm
Ku	12.4 – 18 GHz	2.42 – 1.66 cm
K	18 – 26.5 GHz	1.66 – 1.11 cm
Ka	26.5 – 40 GHz	1.11 cm – 7.5 mm
Mm	40 – 300 GHz	7.5 – 1 mm

Tabla 2.1: División en frecuencias microondas

2.1.2 Conceptos Básicos

2.1.2.1 Parámetros de dispersion

Se pueden caracterizar los circuitos de microondas como una red configurada por unos puertos de entrada y otros de salida, donde cada uno de los puertos presenta una onda reflejada y una onda transmitida [5].



Figura 2.1 Ondas incidentes y reflejadas en un dispositivo de “n” puertas

Se pueden relacionar dichas ondas de entrada y salida mediante la matriz de parámetros S:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Por la cual, para calcular cualquier parámetro $S_{i,j}$ será necesario cargar cada uno de los accesos de la red con su impedancia característica excepto aquel i,j que deseamos calcular, ya que en ella se encontrará el generador que cree la señal incidente. Por lo tanto, de esta manera el parámetro $S_{i,j}$ será:

$$S_{i,j} = \left(\frac{b_i}{a_i} \right)^{s_i} \rightarrow a_k = 0, \quad k \neq i \quad (2.2)$$

Siendo así posible determinar los coeficientes de reflexión ($S_{i,i}$) y los coeficientes de transmisión ($S_{i,j}$).

$$|S_{i,j}|^2 = \frac{\text{Potencia entregada a la carga de la puerta } j}{\text{Potencia disponible del generador en la puerta } i}, \quad j \neq i$$

$$|S_{i,i}|^2 = \frac{\text{Potencia reflejada en la puerta } i}{\text{Potencia disponible del generador en la puerta } i} \quad (2.3)$$

Por ello, es interesante tener un coeficiente de reflexión lo menor posible, dado que así la onda reflejada será lo menor posible, la cual puede llegar a dañar el circuito.

2.1.2.2 Diagrama de Radiación

El diagrama de Radiación consiste en la representación gráfica de las características de la radiación de una antena en función de sus coordenadas espaciales, siendo la más común, en coordenadas esféricas, en las cuales, el radio(r) es la distancia al centro de coordenadas,

Φ el cual es el Angulo de 180 grados que determina la posición en z, mientras que φ determina la posición x,y o azimuth.

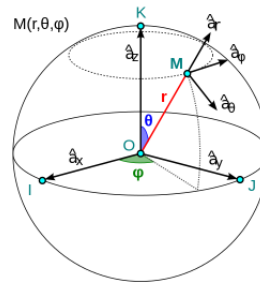


Figura 2.2 Diagrama de radiación de coordenadas cilíndrica

Siendo el campo total el resultante de la suma de las tres componentes.

Aunque el campo sea un campo tridimensional, es muy frecuente verlo en cortes de dos dimensiones, donde se puede observar con más clarividencia los lóbulos secundarios, el ancho de haz... Estos planos suelen ser el plano E, el cual contiene el vector E y la dirección de máxima radiación, y el plano H, el cual también es ortogonal y contiene la dirección de máxima radiación.

Las características principales de radiación son:

- **Lóbulo principal:** Lóbulo en el cual se encuentra la dirección de máximo apuntalamiento.
- **Lóbulos secundarios:** Lóbulos que conforman el sistema de radiación y que se encuentran alrededor del lóbulo principal.
- **Ancho de haz:** Diferencia entre el centro del lóbulo principal y cuando el lóbulo cae a -3 dB.
- **SLL (Side Lobe Lebel):** Diferencia entre el máximo del lóbulo principal y del máximo del lóbulo secundario.

2.1.2.3 Directividad

Se define como intensidad de radiación, es la potencia radiada por unidad de Angulo sólido, es decir, la cantidad de información que es capaz de emitir en una dirección exacta. Siendo así, se puede definir la directividad como la relación entre la intensidad de radiación de la antena frente a la de una antena isotrópica que radiase la misma cantidad de potencia.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{iso}} = 4\pi \times \frac{U(\theta, \varphi)}{Prad} \quad (2.4)$$

2.1.3 Concepto de array de antena

Un array es un conjunto de antenas, comúnmente iguales, ordenadas en el espacio de manera que se comporten como una sola. [6]

Los factores que identifican a un array son los siguientes:

- La colocación geométrica de los elementos del array

- El espacio entre cada elemento (también denominado d)
- La amplitud con la cual se alimenta cada elemento (también llamada a_n)
- La fase con la cual se alimenta cada elemento (también llamada α_n)
- El diagrama de radiación de cada uno de los elementos

En función de su distribución, pueden ser array lineales, planos o conformados.

2.1.3.1 Array Lineales

Son aquellos arrays de N elementos, en el que estos están situados sobre el mismo eje.

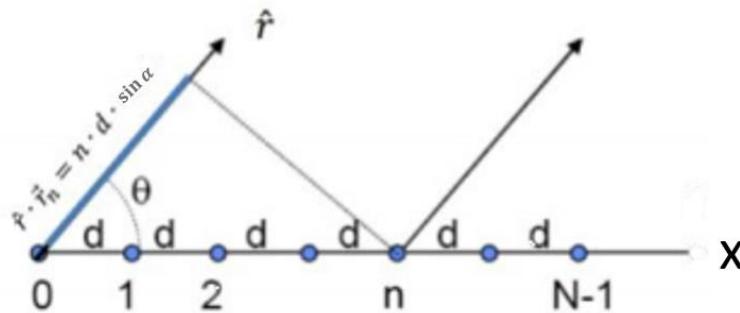


Figura 2.3 Array lineal de N elementos

Si los elementos conformantes son iguales y de idéntica distancia, alineados respecto a x , su vector posición quedaría definido como:

$\mathbf{r}_n = n \cdot d \cdot \mathbf{\hat{x}}$ donde su alimentación quedaría como $A_n = a_n \cdot e^{j\alpha_n}$, con lo cual el factor de array queda así:

$$F_A = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n \cdot k_0 \cdot d \cdot \sin \alpha + \alpha_n)} \quad (2.5)$$

En función de la alimentación, variará el comportamiento del array. Típicamente, se suele encontrar uniforme en amplitud y fase, fase progresiva, uniforme en amplitud y fase progresiva o taper)

2.1.4 Bocinas

Una bocina consiste en una antena de apertura cuyas características se componen de gran ancho de banda y bajas pérdidas. Para ello, suelen estar alimentadas mediante guías de onda que pueden propagar uno o varios modos. Las dimensiones aumentan progresivamente hasta obtener las dimensiones deseadas que ofrezcan la directividad necesaria. Al aumentar dichas dimensiones, se produce una diferencia de fase, la cual implica que la distribución de fases en las bocinas será igual al de la guía, pero con un término adicional

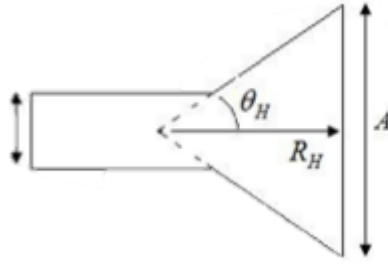


Figura 2.4 Parámetros y geometría de una bocina

2.1.4.1 Bocinas sectoriales de plano H

Son aquellas bocinas en las cuales su apertura se produce en el plano horizontal y que se alimentan por guía de onda rectangular. Propagan el modo fundamental TE_{10} .

Para diseñar una bocina óptima (aquellas que ofrecen la máxima directividad y ganancia a la frecuencia de diseño) y mínimo error de fase, se debe tener en cuenta dichas equivalencias:

$$t_{\text{opt}} = \frac{A_{\text{opt}}^2}{8 \cdot R_1 \cdot \lambda_0} \quad (2.6)$$

2.2 Tecnología GAP

2.2.1 MetaMateriales

La tecnología GAP se basa en el concepto de meta materiales, y en la definición de materiales hard y soft[7]. Los metamateriales son elementos artificiales que presentan características electromagnéticas inusuales, como es el conductor magnético, lo cual implica que estas superficies pueden crear artificialmente una conductividad magnética, llamada Artificial Magnetic Conductor, o idealmente, Perfect Magnetic Conductor.

Las superficies soft y hard son superficies que cumplen esta característica, y además, son anisótropas, lo que significa que favorecen la propagación de las ondas Electromagnéticas en una dirección en la cual se tiene el máximo de potencia (dirección hard) y se impide la propagación en la dirección perpendicular (dirección soft). Normalmente, las superficies soft se construyen mediante corrugaciones.

La tabla 2.2 [8] resume las propiedades de impedancia de las superficies artificiales ideales de los modos TE y TM, donde se observa que las superficies har y soft son una combinación de las Perfect Electric Conductor (PEC) y PMC.

	TE	TM
Hard	$|Z_{TE}|=\infty$	$|Z_{TM}|=0$
Soft	$|Z_{TE}|=0$	$|Z_{TM}|=\infty$
PEC	$|Z_{TE}|=0$	$|Z_{TM}|=0$
PMC	$|Z_{TE}|=\infty$	$|Z_{TM}|=\infty$

Tabla 2.2 Propiedades de impedancia de los modos TE y TM

De esta manera se pueden emplear estas estructuras para eliminar la propagación de ondas en ciertas bandas de frecuencias, para que actúen como filtros.

2.2.2 Teoría de la GAP

Teóricamente, si se consideran dos placas paralelas, una de PEC sobre otra de PMC, si la diferencia de distancia es menor que un cuarto de longitud de onda, no se propagaran las ondas, estando todos los modos de ambas placas en corte según las condiciones de contorno de ambas superficies. Sin embargo, esto cambiaría si ambas placas son de PEC, dado que las ondas TEM si se propagasen en espacio que hay entre ambas. Este espacio se denomina GAP. Si la placa inferior de PEC está rodeada por PMC, esta impedirá que haya propagación por donde este rodeado de PMC, permitiendo solo la propagación donde haya PEC en ambas caras, actuando, así como si las paredes de PMC fuesen las paredes metálicas típicas de una guía convencional. De esta manera, solo habrá propagación por el gap que hay entre ambas placas de PEC, incluso aunque no haya contacto entre ambas placas.

Dado que las superficies PMC no existen en la naturaleza, es necesario diseñarlas. Las más comunes son las configuradas por “camas” de pines, es decir, por estructuras periódicas de pines metálicas, que configuran un rango de frecuencias en las cuales la estructura formada por los pines tiene una impedancia muy alta, por la cual impide la propagación (siendo esta banda de frecuencias conocida como stopband o banda prohibida). El diseño de la cama de pines es sencillo de construir, puesto que se puede construir empleando solo metal y puede ser construido empleando técnicas convencionales de fresado.

2.2.2.1 Groove Gap Waveguide

Existen distintos tipos de gap waveguide. Uno de ellos la RGB o ridge gap waveguide, consiste en que la estructura de la cama de pines se encuentra empotrada en una tira metálica llamada ridge, que es la encargada de conducir el campo a través de un camino establecido.

Otro posible tipo de gap waveguide sería el diseñado con tecnología microstrip, en la cual el sustrato dieléctrico está suspendido sobre una estructura PMC.

En nuestros diseños se empleará la Groove Gap Waveguide. Este tipo de guía Gap se basan en que las ondas electromagnéticas se propagan entre un espacio existente en el interior de un canal (llamado gap) el cual está rodeado por la estructura de pines. Las guías Groove Gap tienen un funcionamiento similar a las guías de onda convencionales, permitiendo la propagación de modos TE/TM con su frecuencia de corte dada por su anchura(a) y altura(b).

3 Diseño de Estructura

3.1 Especificaciones y características de la guía

Las características básicas de la guía vienen diseñadas para tratar de replicar los resultados obtenidos por el trabajo implementado en [1] pero bajo el empleo de la tecnología Gap, por lo cual la mayoría de las especificaciones serán idénticas que aquellas.

Las características comunes a las distintas estructuras de los diseños implementados son las siguientes.

- Frecuencia central de diseño, $f_c=17$ GHz
- Anchura de la guía(a) 11 mm y altura (b) 5.5 mm.
- Guía de onda con tecnología Gap Waveguide
- Banda de trabajo de 16 GHz a 18 GHz.

Si bien no hay gran diferencia entre tecnología gap y tecnología convencional a la frecuencia de diseño, se ha decidido desarrollar con dichas especificaciones.

3.2 Tornillos de ajuste de fase

Con el objetivo de tratar de crear desfases en las distintas redes y estructuras implementadas, se ha procedido a emplear tornillos de ajuste.

La forma de los tornillos será cilíndrica, con un diámetro de 2 mm. Los tornillos tendrán dos configuraciones posibles: introducidos totalmente en la guía, o sin llegar a tener contacto con ésta (siendo a efectos prácticos como si no estuvieran).

A lo largo del estudio, se ira procediendo a establecer y a analizar las distintas posiciones para los tornillos en las estructuras, así como el número de estos en ella y la distancia entre ellos y entre pares de ello, que nos permitan obtener la mejor relación entre ancho de banda y desfase entre puertas posible.

El funcionamiento de los tornillos de ajuste de fase se basa en que sus presencias producen una discontinuidad en la guía que generara un desfase en la señal que se propaga por la guía, permitiendo así obtener configuraciones de fases distintas en esta.

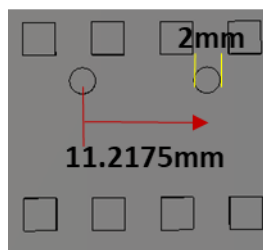


Figura 3.0 Guía con par de tornillos de ajuste de fase

3.3 Divisor de cuatro puertas en tecnología convencional

Como ya se ha visto en el apartado 1.2 el objetivo principal de este trabajo de fin de grado es replicar el estudio diseñado en el trabajo [1] empleando por tanto la tecnología Groove Gap Waveguide.

Por lo tanto, la estructura a implementar es la siguiente:

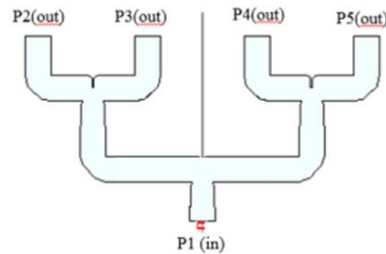


Figura 3.1 Divisor de cuatro puertas original

En la cual, se estudiará el efecto de la introducción de los tornillos de ajuste de fase.

3.4 Divisores en T

3.4.1 Divisor en T de Salida

Este TFG partió del diseño de un divisor de potencias dos puertas en tecnología Groove gap WavGuide punto 2.2.2 diseñado por el trabajo implementado [1].

En dicho estudio se determinó que el diseño se efectuaría empleando tres clases de pines. En la tabla 3.1 y gráfica 3.2 se muestran los resultados del ancho de pin(w) y distancia entre pines.

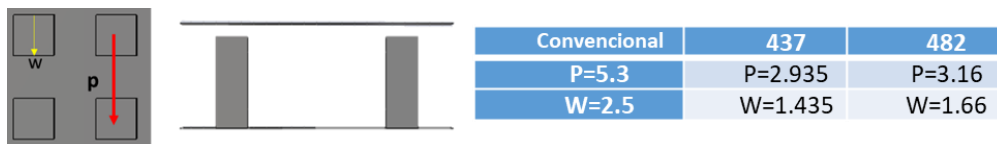


Figura 3.2 Ejemplo de diseño de pines periódicos

Este divisor será el empleado para el diseño de los dos divisores que configuran las salidas de los divisores de la estructura final. Como se aprecia en la figura 3.3, el diseño consta de una puerta de entrada (puerto uno) que diverge en dos puertas de salida (puerto dos y puerto tres), de manera que se obtenga un reparto de potencia y de fase idéntico entre las puertas de salida, tratando de minimizar al máximo la posible potencia que no se transmita por ambas puertas.

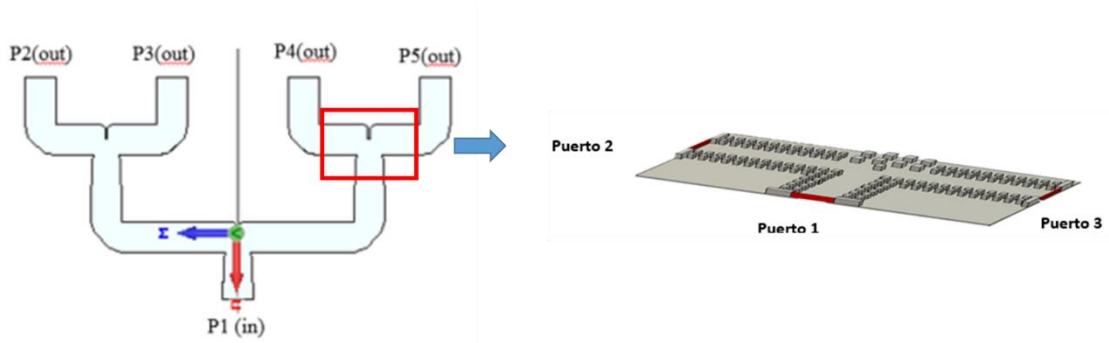


Figura 3.3 Divisor De potencias T

Los parámetros a tener en cuenta durante todo el diseño son los siguientes:

- Coeficiente de adaptación o S11: Se debe asegurar que el cómputo total de potencia entregada por la puerta de entrada sea transmitido a las puertas de salida. Para ello, es necesario que la estructura está adaptada a la frecuencia de diseño establecida.
- Coeficientes de transmisión (S21 y S31): En dichos coeficientes hay que diferenciar claramente entre amplitud y fase.
 - Amplitud: La potencia de la señal que llega al puerto de salida referente al puerto de entrada. En todas las simulaciones se requerirá que sean los más semejantes posibles entre las distintas puertas.
 - Fase: A lo largo del estudio con las distintas configuraciones de tornillos, se tratará de obtener diferencias en las fases entre los distintos puertos.

Para lograr adaptar la estructura a la frecuencia de trabajo, se añadió dos protuberancias adyacentes a ciertos pines 482 de la guía de entrada los cuales ajustando su grosor permitían manipular en cierta medida su adaptación.

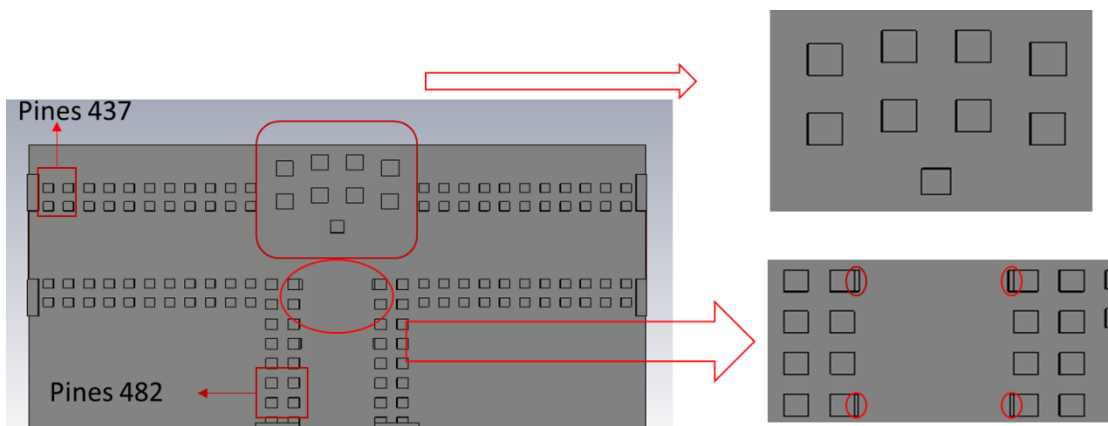


Figura 3.4 Parámetros empleados para el diseño de la T

Los parámetros S obtenidos son los siguientes:

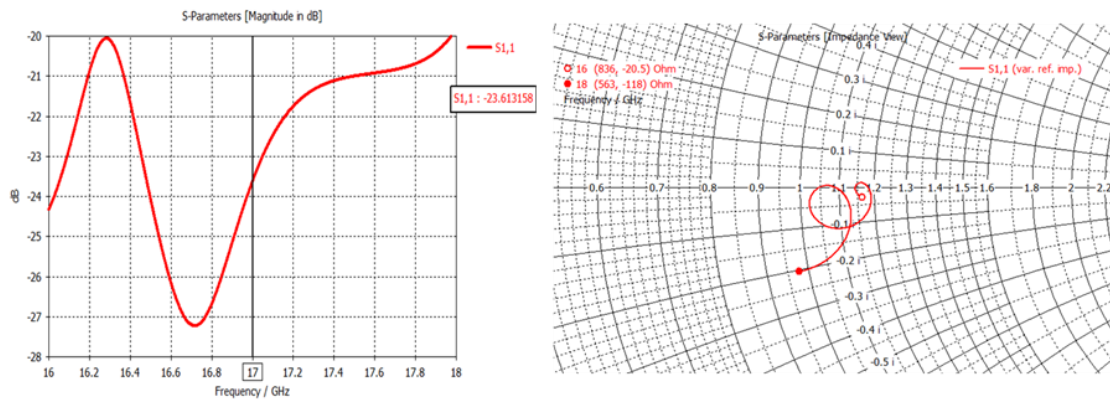


Figura 3.5 Adaptación en dB y carta de Schmitt del divisor en T

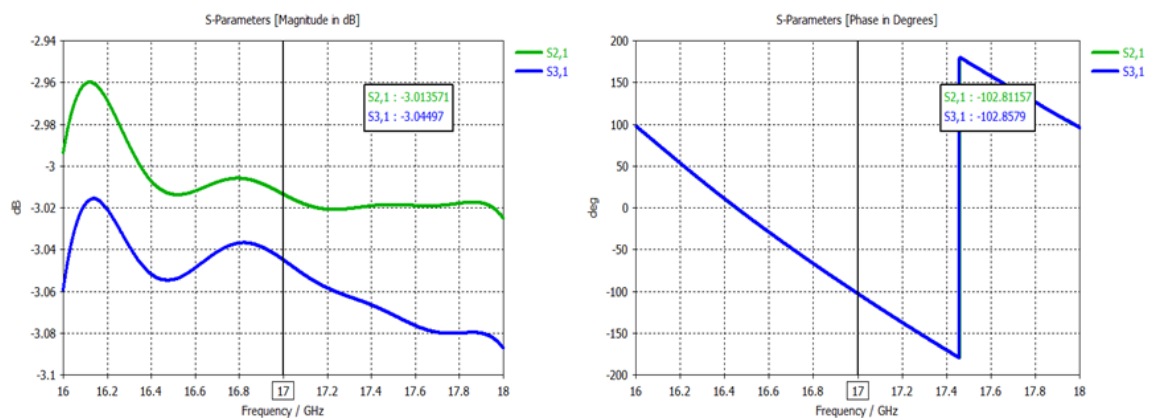


Figura 3.6 Parámetros de transmisión en amplitud y fase del divisor en T

A la vista de las figuras 3.5 y 3.6, se puede observar un reparto equitativo entre ambas puertas de salida, así como una adaptación que nos permite tener un ancho de banda por debajo de los -20 dB.

También se puede observar que los desfases entre las puertas son prácticamente nulos.

3.4.1.1 Divisor en T de Salida con tornillos de ajuste de fase

Una vez comprobadas dichas respuestas se procede a la introducción de tornillos. Se decide introducir dos tornillos formando un par, puesto que de esta manera la presencia de cada tornillo compensa la desadaptación producida por el otro. Para lograr esa compensación es necesario que haya una distancia aproximada a $\lambda/4$ (debido a que $\lambda/4$ implica dar media vuelta en la carta de Schmitt) para lograr adaptar la estructura.

Los resultados de introducir ambos tornillos se pueden ver a continuación:

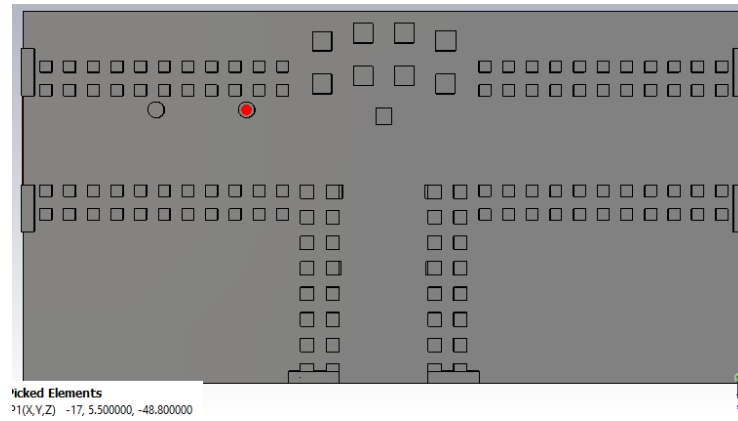


Figura 3.7 Divisor de potencias T con dos tornillos

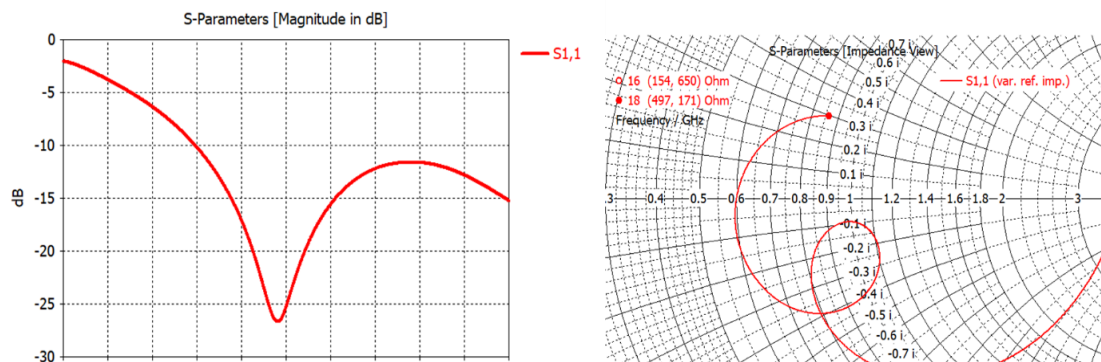


Figura 3.8 Adaptación en amplitud y carta de Schmitt Del divisor T con tornillos

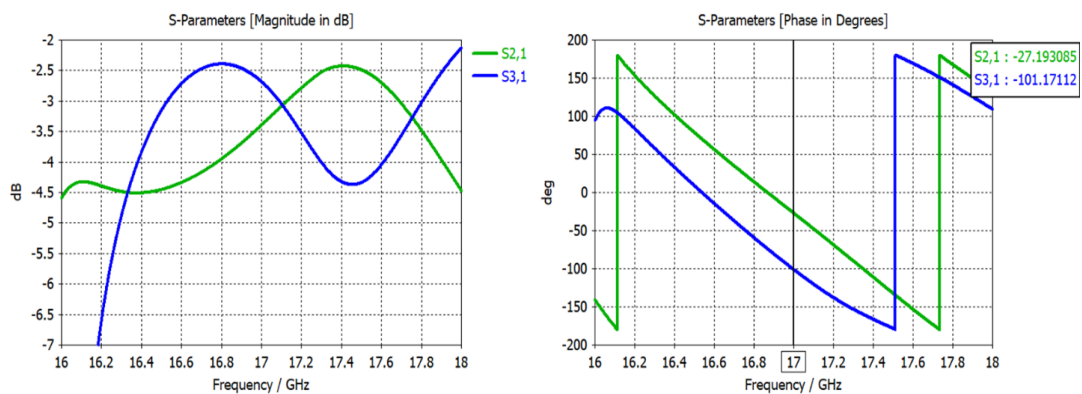


Figura 3.9 Parámetros de transmisión en amplitud y fase del divisor en T

Se observa que la presencia de tornillos estrecha el ancho de banda y desajusta la adaptación. Además, también aumentan, a lo largo de la banda de trabajo, las descompensaciones en el reparto de amplitud de las distintas puertas. También se demuestra que la inserción de tornillos produce un desajuste de fase entre las puertas de salida, en este caso de aproximadamente 75 grados.

3.4.1.2 Divisor de Salida con tornillos alrededor de la hilera de pines cercana a la entrada

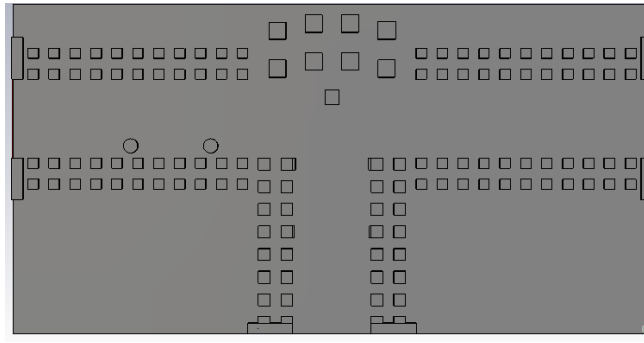


Figura 3.10 Divisor T con tornillos en la parte inferior de la guía

EL siguiente caso de estudio, consiste en observar si se presentaban cambios en los parámetros S cuando los tornillos de ajuste de fase se encontraban posicionados alrededor de la hilera de pines más cercana a la entrada de la guía. Los resultados de sus parámetros S son los siguientes:

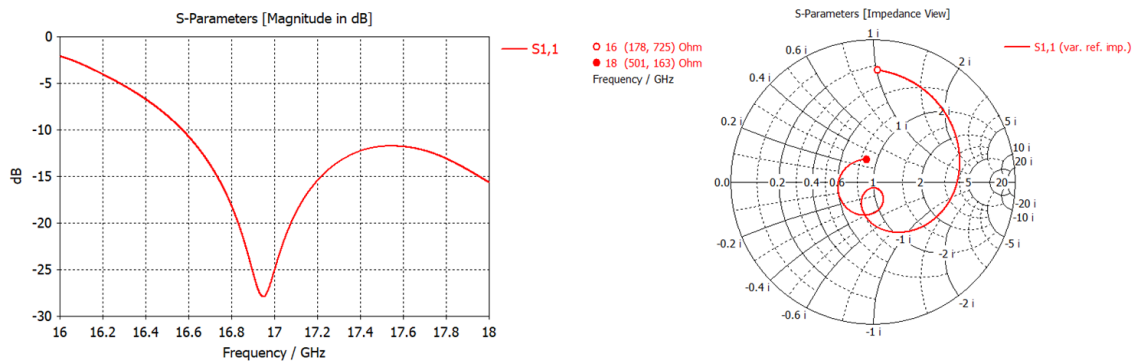


Figura 3.11 Adaptación con dos tornillos próximos a la hilera de pines inferior

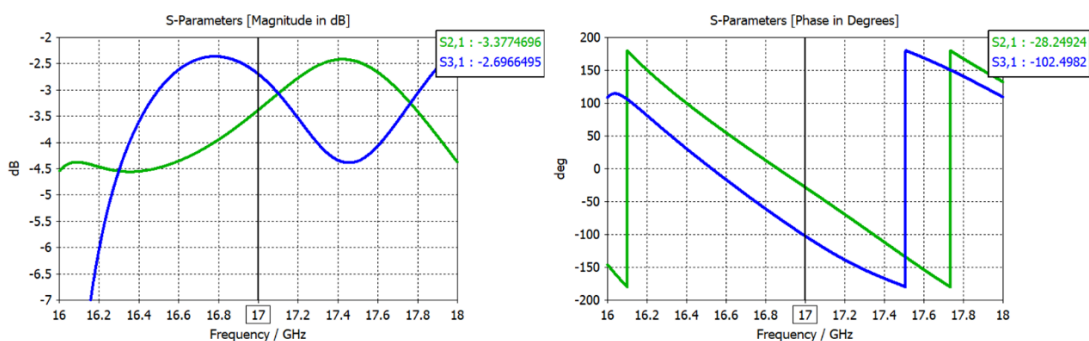


Figura 3.12 Variación del parámetro S31 por el desplazamiento de los tornillos

3.4.2 Divisor en T de salida

Para poder configurar el divisor de potencias que une ambos divisores de salida, fue necesario alargar ambos extremos finales del divisor empleado en la fig. 3.3, de manera que en un futuro la distancia entre P2 y P3 fuese la misma que entre P3 y P4.

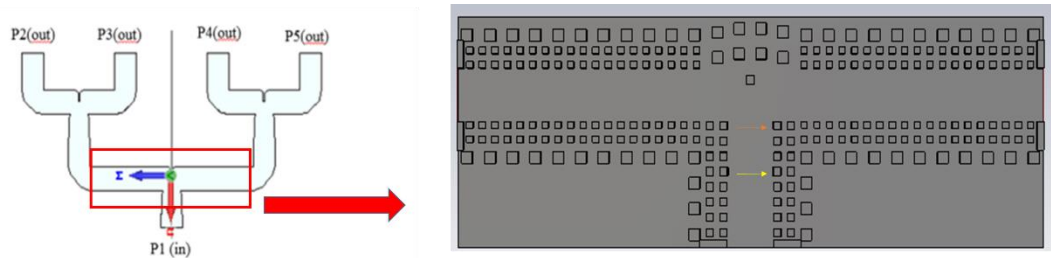


Figura 3.12 Divisor de entrada

Alargar el divisor supuso una ligera desadaptación de la estructura, la cual se arregló aumentando ligeramente el grosor de la protuberancia del quinto pin empezando por la guía de entrada (flecha amarilla en la figura 3.12), y disminuyendo el grosor de la protuberancia correspondiente al octavo pin de la guía de entrada (flecha naranja en la figura 3.12). Por tanto, se consiguieron los siguientes parámetros S.

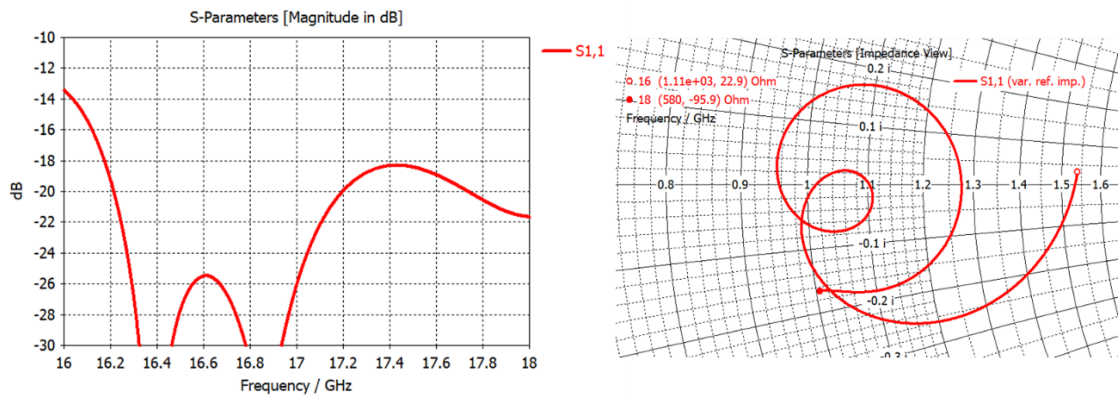


Figura 3.13 Parámetro S11 Divisor alargado

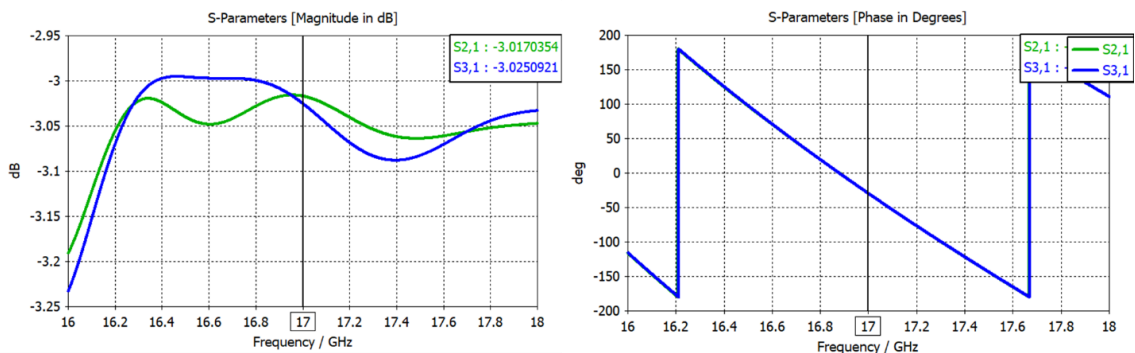


Figura 3.14 Parámetro S21 y S31 Divisor alargado

3.4.2.1 Divisor T de salida con dos pares de tornillos

Tras ampliar la guía, se procede al estudio del efecto de dos pares de tornillos sobre los parámetros S en el divisor de potencias tipo T. Para ello, se añaden dos nuevos tornillos

a la derecha del primer par, a 15 mm del centro y a 9 mm de distancia respecto al primer par.

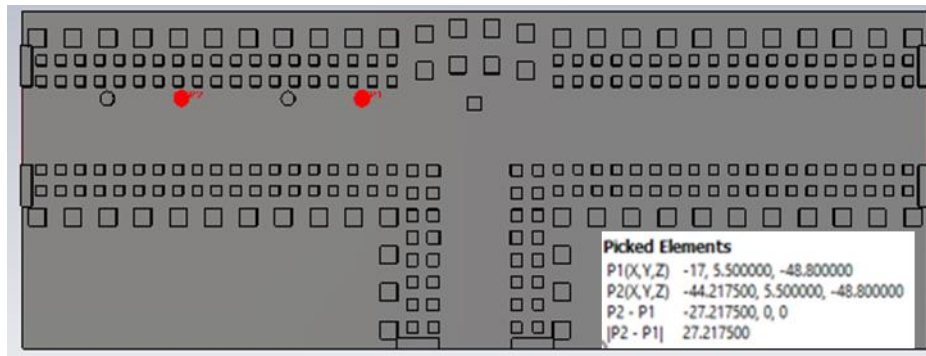


Figura 3.15 Divisor T con dos pares de tornillos

Siendo sus parametros S los siguientes:

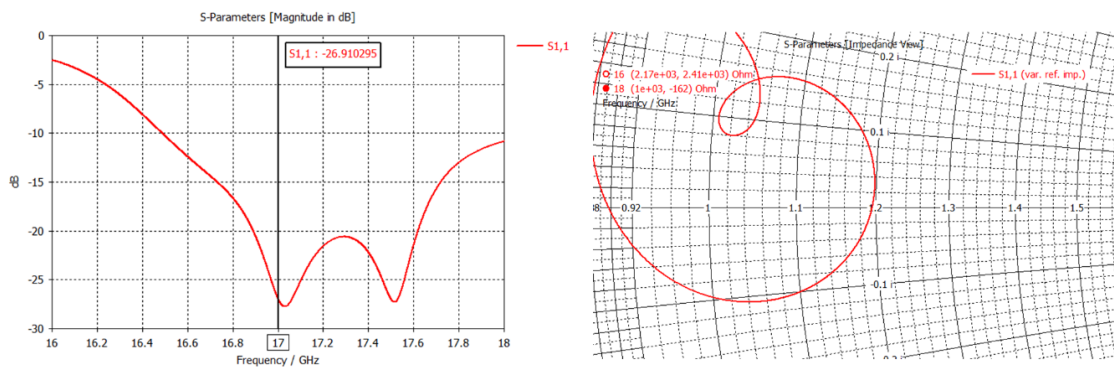


Figura 3.16 Adaptación con dos pares de tornillos

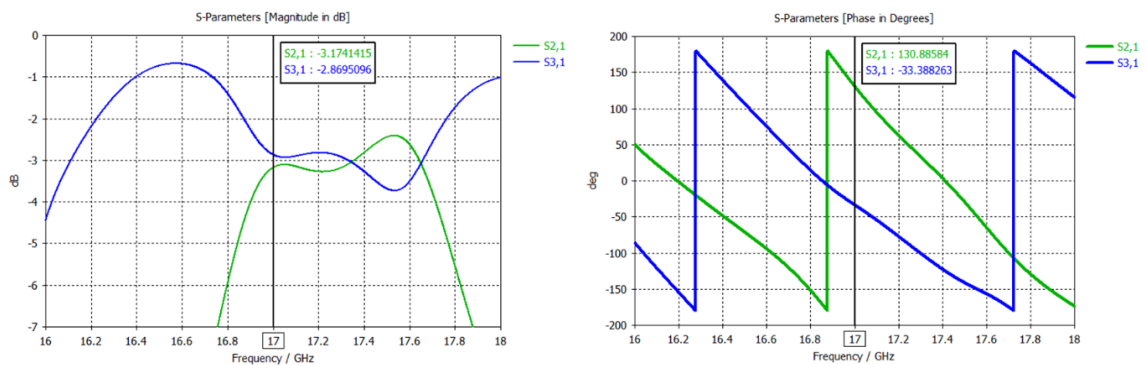


Figura 3.17 Transmisión con dos pares de tornillos

Como en los casos anteriores, la presencia de los tornillos de ajuste de fase estrecha el ancho de banda de la amplitud de la adaptación, acotando el ancho de banda por debajo de los -20 dB a 700 MHz, desde 16.9 GHz a 17.62 GHz, y acotando el ancho de banda a -10 dB a 1.5 GHz, desde 16.5 GHz a 18 GHz.

En cuanto a la fase de la transmisión, se consiguen 160 grados de desfase positivo entre la puerta 2 y la puerta 3, los cuales parecen logicos respecto a los 75 grados de la

presencia de dos tornillos en la guía del apartado 3.4.1.1, donde se conseguían desfases de 75 grados. Por lo tanto, parece lógico que al haber dos pares de tornillos se consiga el doble de desfase que cuando solo hay un par.

Los valores nominales para dicha configuración serán: 16 mm de separación que nos proporciona un ancho de banda de 900 MHz y un desfase respecto a sin tornillos de 157 grados positivos en los brazos de la guía en la que se encuentran los tornillos en comparación con la que no tiene tornillos.

3.4.3 Resumen indicativo del ajuste de tornillos

Con el objetivo de lograr distintas configuraciones de fases, se procedió a elaborar un estudio de las distintas distribuciones de los tornillos, y las distintas combinaciones que se podían llegar a elaborar con ellos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

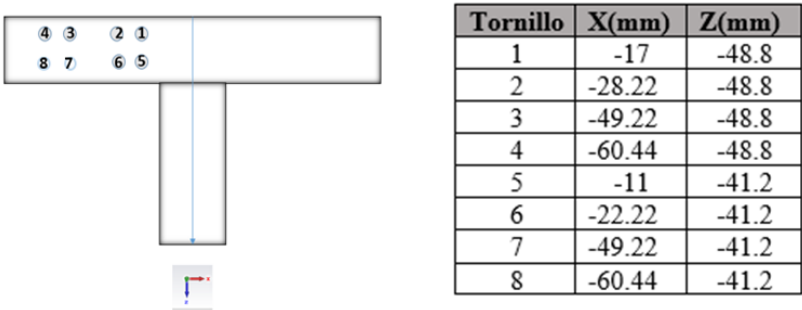


Figura 3.18 Posición de los tornillos en divisor T Tabla 3.1

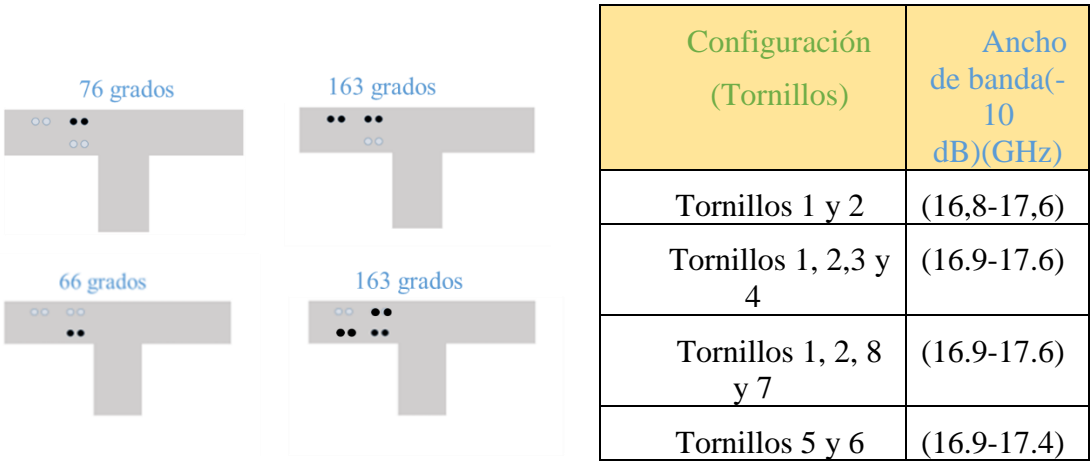


Figura 3.19 Desfases y ancho de banda

3.5 Codo

Con el objetivo de tratar de girar ambos brazos del divisor en forma de T para lograr que las puertas finales estén alineadas respecto a x , y se pueda ampliar el divisor respecto a z , fue necesario la elaboración de codos en tecnología gap que nos lo permitiesen. Para ello, se diseñó de manera individual la doblez de la guía inferior en z , mientras que la superior se hizo un giro abrupto de 90 grados.

Dado que la presencia del codo introducía una discontinuidad, fue necesario volver a rediseñar los parámetros de la figura 3.3 para volver a readaptar la estructura.

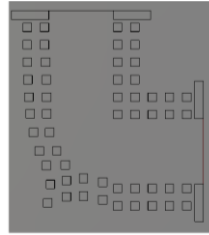


Figura 3.20 Diseño del codo

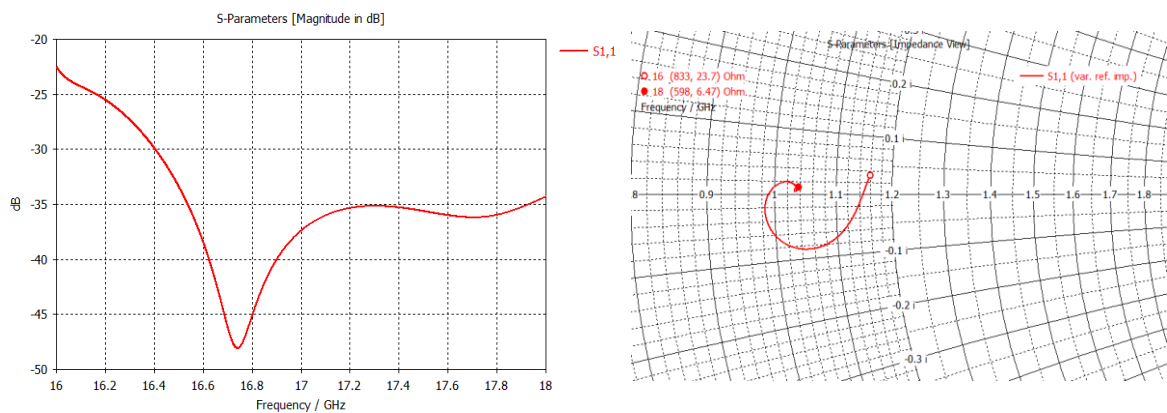


Figura 3.21 Adaptación en amplitud y en carta de Schmitt del codo

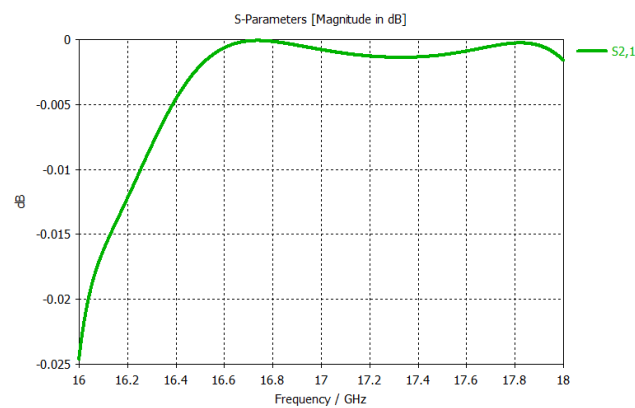


Figura 3.22 Transmisión en amplitud del codo

3.6 Divisor con codo

Debido a las distintas aplicaciones que podía llegar a tener la ampliación del estudio, fue necesario la implementación de codos (apartado 3.5) que permitiesen girar las salidas de las estructuras de modo que las salidas de los divisores estuviesen alineadas respecto a \underline{x} .

3.6.1 Divisor de salida

El siguiente divisor original es el mismo que de fig. 3.3 y 3.4 donde se han introducido los codos con el objetivo de doblar la estructura.

+

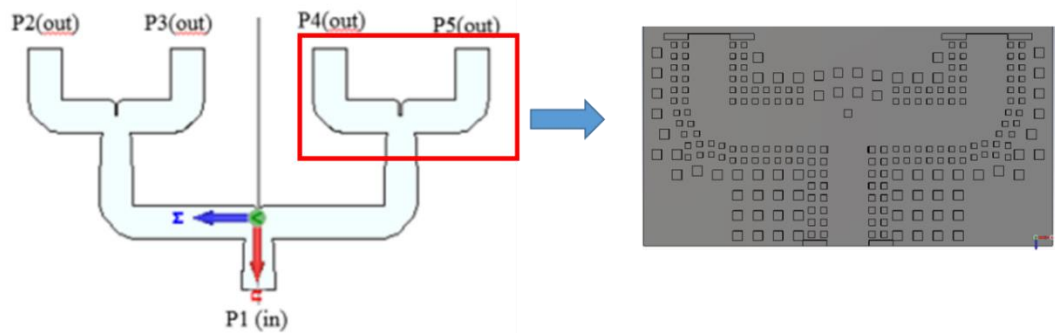


Figura 3.23 Divisor con codo

Siendo los parámetros S los siguientes:

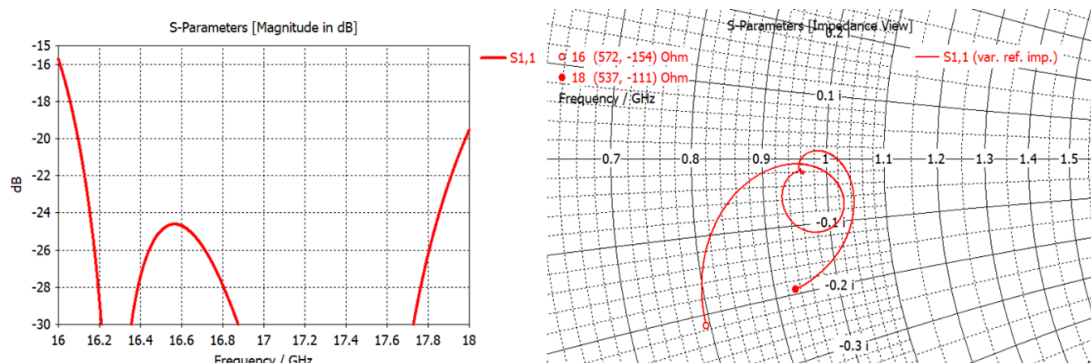


Figura 3.24 Parámetro S11 divisor de dos puertas con codo

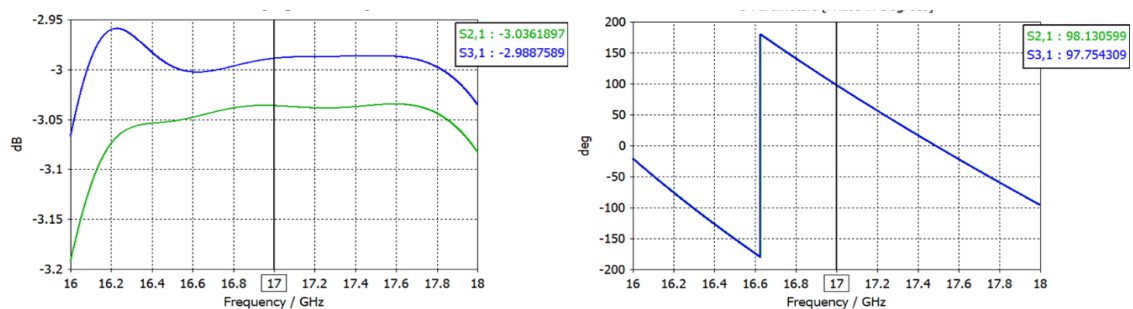


Figura 3.25 Transmisión del divisor de dos puertas con codo

Como se puede observar en la fig. 3.24 la presencia del codo en el divisor de potencias ha perturbado la adaptación, logrando, por tanto, que se mantenga por debajo de los -20 dB para prácticamente el ancho de banda completo.

3.6.1.1 Divisor de salida con dos tornillos

Posteriormente se introducen dos pares de tornillos, para observar si el efecto de los tornillos es similar al del divisor original, o si por el contrario, la presencia del codo altera la salida de los puertos. Al igual que en el apartado 3.4.1, el tornillos mas cercano al centro del divisor se encuentra a -17 mm de este.

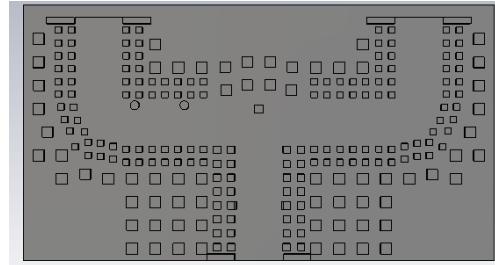


Figura 3.26 Divisor de dos puertas con codo y tornillos

Siendo los resultados de los parametros S del divisor de potencias

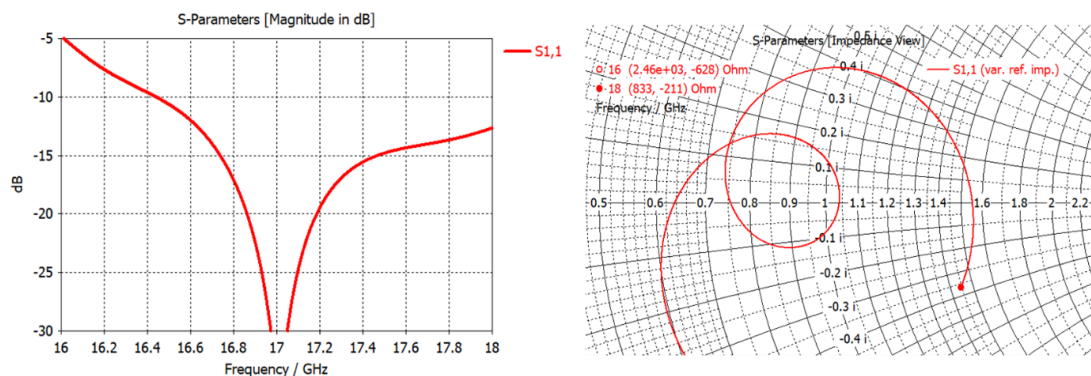


Figura 3.27 Adaptación del divisor con codo con dos tornillos

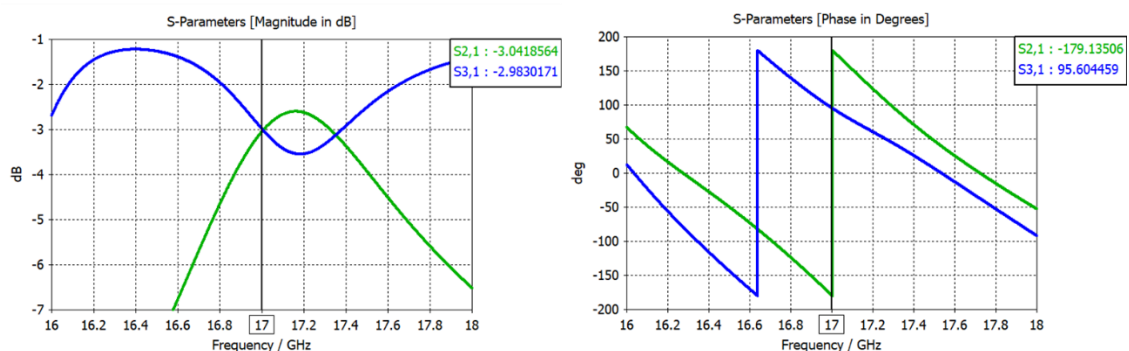


Figura 3.28 Transmisión de divisor con codo dos tornillos

Los resultados de los parámetros S son similares a los de la guía de la figura 3.7, aunque siendo la adaptación en cierto modo de peor comportamiento y profundidad que os obtenidos en la figura 3.25, debido al efecto de los tornillos en la adaptación del divisor.

3.6.2 Divisor de entrada

Se procede a introducir los codos en el divisor del apartado 3.4.2 para observar los efectos de estos en la estructura.

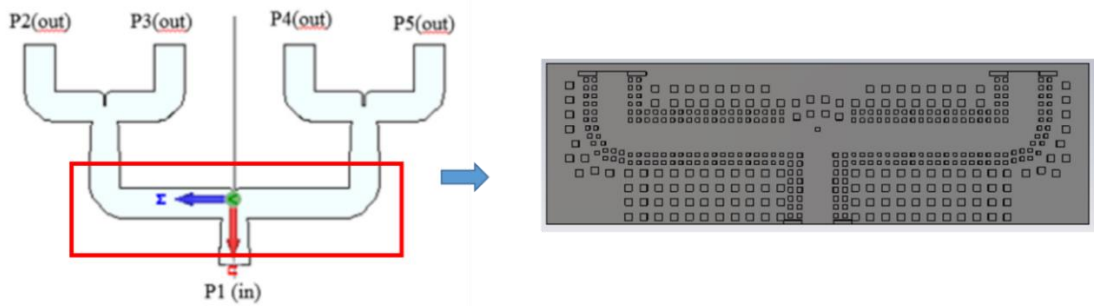


Figura 3.29 Divisor alargado con codo

Siendo sus parámetros S los siguientes:

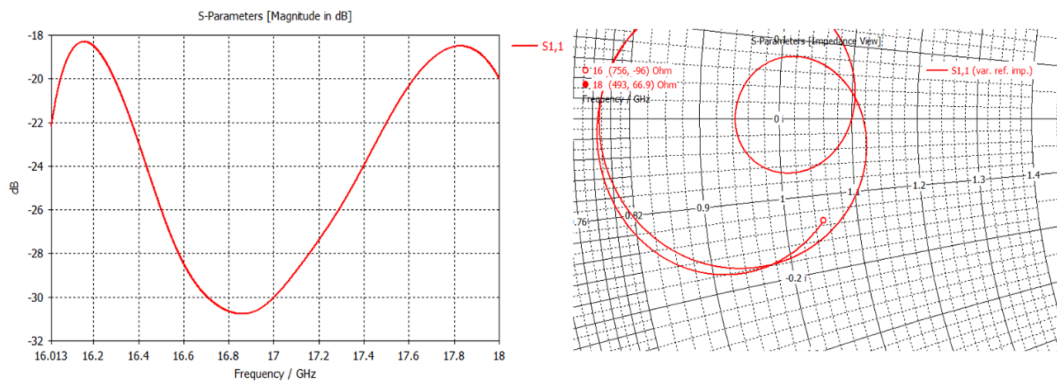


Figura 3.30 Adaptación del divisor alargado con codo

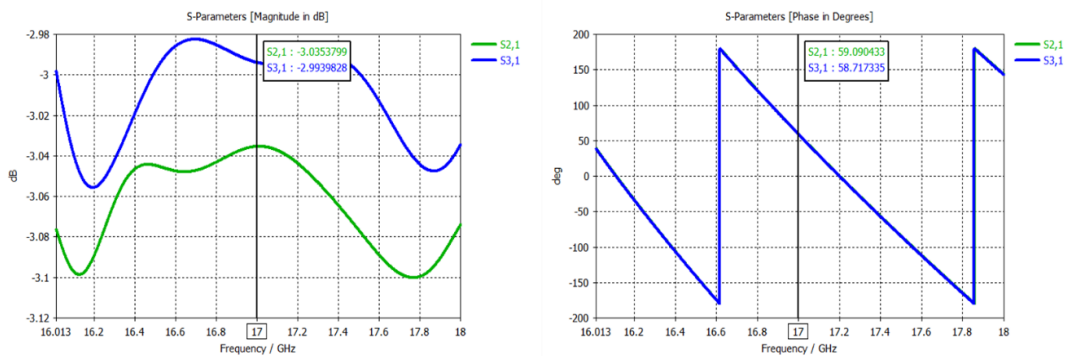


Figura 3.31 Transmisión del divisor alargado con codo

El hecho de aumentar la longitud de ambos brazos de la guía supone como en el caso del apartado 3.4.2 respecto del apartado 3.4.1 la pérdida de ancho de banda de adaptación, ya que este alargamiento supone “desenroscar” el parámetro S11 de la carta de Schmitt.

Sin embargo, se obtiene un ancho de banda de -18dB para toda la banda de frecuencia, y un ancho de banda de 1.3 GHz por debajo de los -20 dB (desde los 16.3 GHz hasta los 17.6 GHz), siendo resultados bastante óptimos.

3.6.2.1 Divisor de entrada con dos tornillos

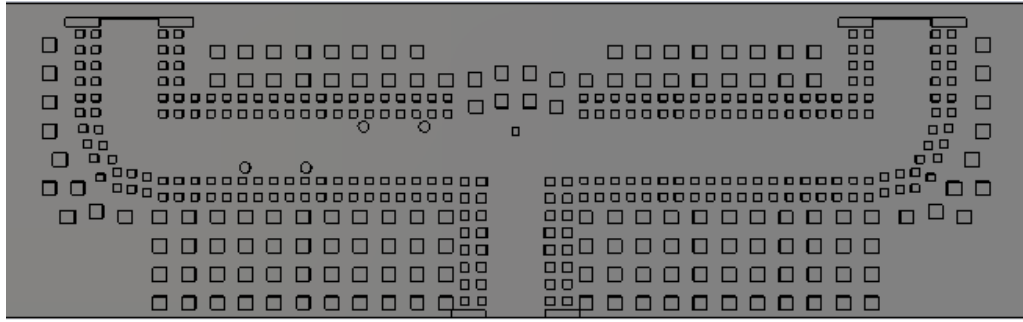


Figura 3.32 Divisor alargado con codo

Siendo sus parámetros los siguientes:

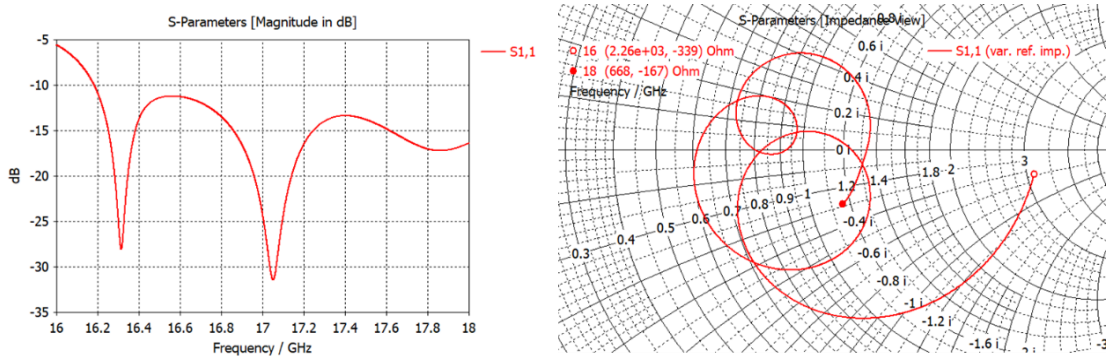


Figura 3.33 Adaptación del divisor alargado con codo

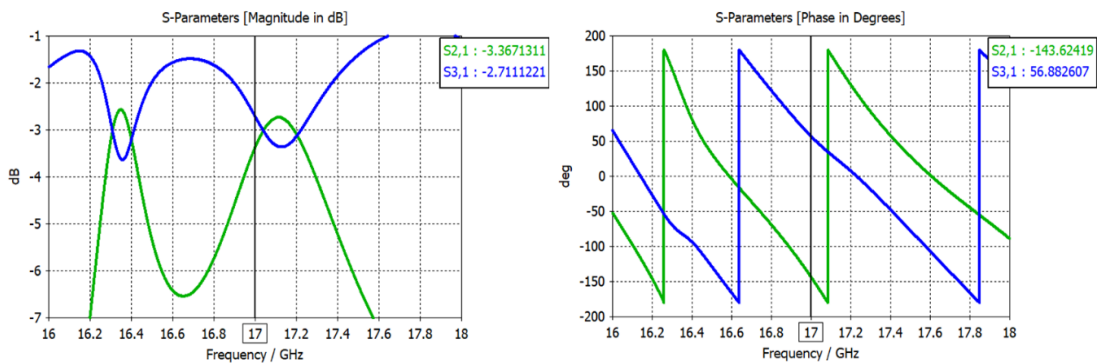


Figura 3.34 Transmisión del divisor alargado con codo

Los resultados de la figura 3.33 ofrecen un ancho de banda de -10dB para prácticamente toda la banda de frecuencia y un desfase entre la salida 2 y la salida 3 de 160 grados.

3.7 Divisor de cuatro puertas

Una vez diseñado el codo, diseñados los divisores e integrados los codos en ambos divisores, se procede a diseñar el divisor de cuatro puertas.

Para asegurar un correcto comportamiento de fase y de amplitud, los cuatro brazos deben ser iguales e idénticos ente si, de manera que el reparto de amplitud y fase entre puertas sea idéntico. A su vez, con el objetivo de formar un array de bocinas, las distancias entre los puertos deben ser identicas, de manera que el array tenga la misma distancia entre elementos:

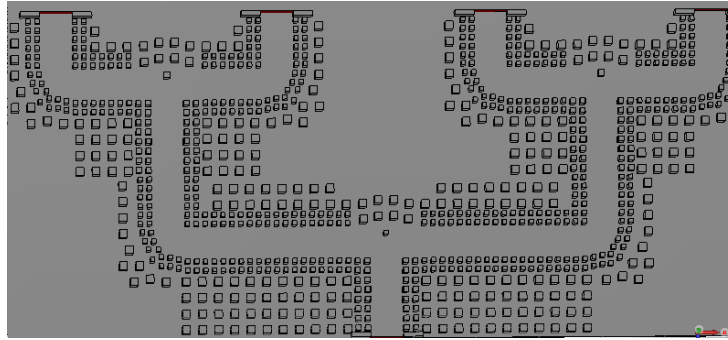


Figura 3.35 Divisor de cuatro salidas

Una vez unidos, se observa que la estructura fue configurada de modo que la distancia entre todas las salidas de los puertos debían ser iguales entre ellas (es decir, la distancia entre el puerto 2 y el puerto 3 debía ser igual que la distancia entre el puerto 1 y 2 y el puerto 3 y 4).

Siendo sus parámetros S los siguientes:

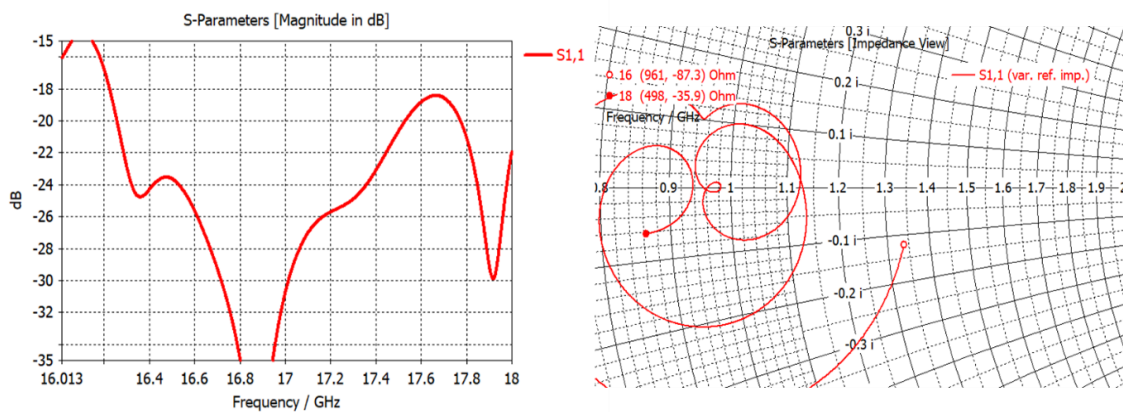


Figura 3.36 Adaptación del divisor de cuatro puertas

En cuanto a la adaptación, la estructura final presenta un ancho de banda 1,3 GHz por debajo de los -20 dB (desde 16.2 GHz a 17.5 GHz) y prácticamente 2 GHz, desde 16 hasta 18 GHz por debajo de los -15 dB.

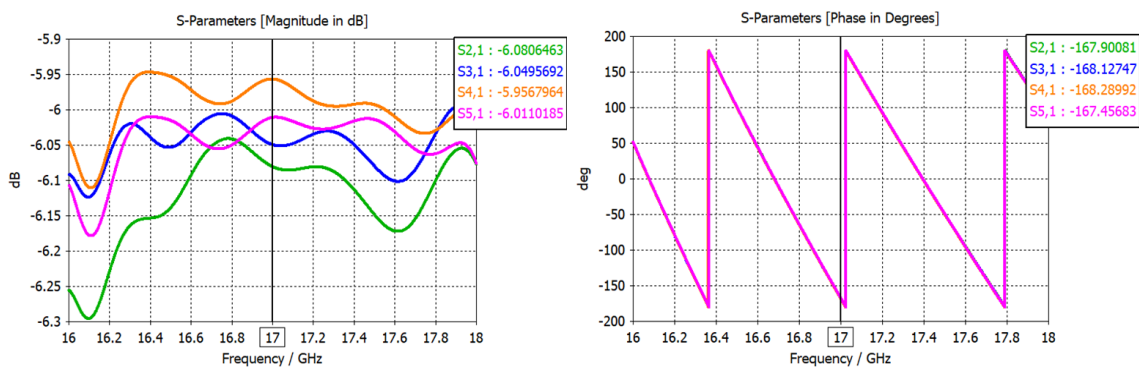


Figura 3.37 Transmisión del divisor de cuatro puertas

En cuanto a la transmisión, la amplitud de las cuatro puertos es prácticamente la misma y en torno a los -6 dBs que corresponde con la potencia de entrada dividida entre 4 (es decir prácticamente la potencia de entrada se divide entre las 4 puertas de manera idéntica).

La fase es prácticamente igual para las cuatro puertas, y se encuentra en los -168 grados de fase.

3.7.1.1 Divisor de cuatro puertas con pines de ajuste de fase

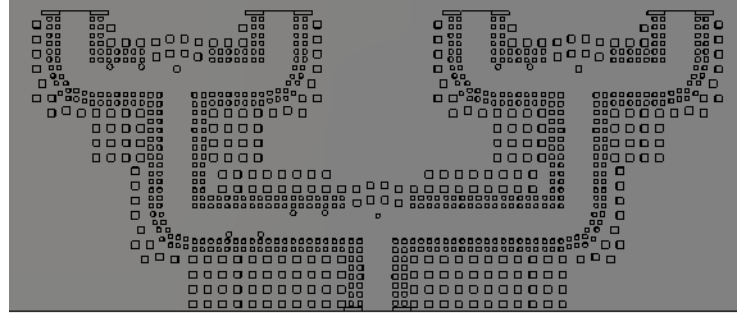


Figura 3.38 Divisor de cuatro puertas con tornillos de ajuste de fase que proporcionan fase progresiva de 80 grados

Dado que, en muchas ocasiones, es necesario un desfase progresivo entre puertas para lograr un desapunte de la radiación final de la antena, y empleando los resultados anteriores, se dedujo una posible configuración de tornillos que desapuntara progresivamente toda la estructura de manera que se obtuviese un desfase entre puertas de +80 grados entre ellos (figura 3.41 y 3.40).

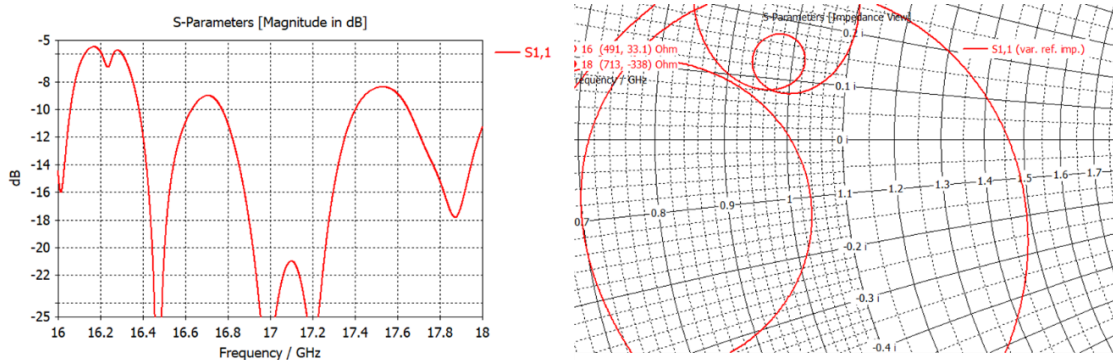


Figura 3.39 Adaptación del Divisor de cuatro puertas con tornillos de ajuste de fase

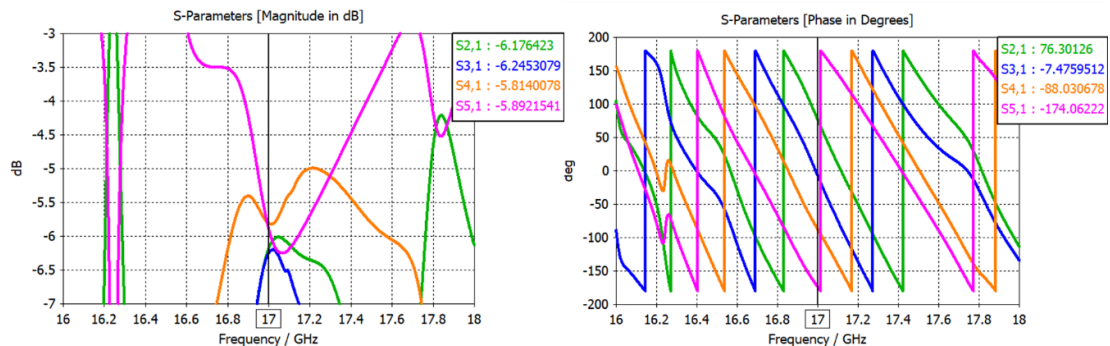


Figura 3.40 Transmisión del Divisor de cuatro puertas con tornillos de ajuste de fase

La presencia de los tornillos de ajuste de fase supone que la señal se estrecha más, y se desadapte la estructura, de manera que solo encontramos 600 MHz por debajo de los -10dB (de 16.8 a 17.4 GHz).

En cuanto a las transmisiones, a la frecuencia central divergen ligeramente en modulo, (de los -5.8 a los -6.1 dB) pero a frecuencias alejadas de la central presentan un desajuste excesivamente grande. Sin embargo, se consigue el desfase de aproximadamente 80 grados entre puertos.

En la grafica 3.41 se caracterizan dichos desfases empleando la siguiente configuración de pines:

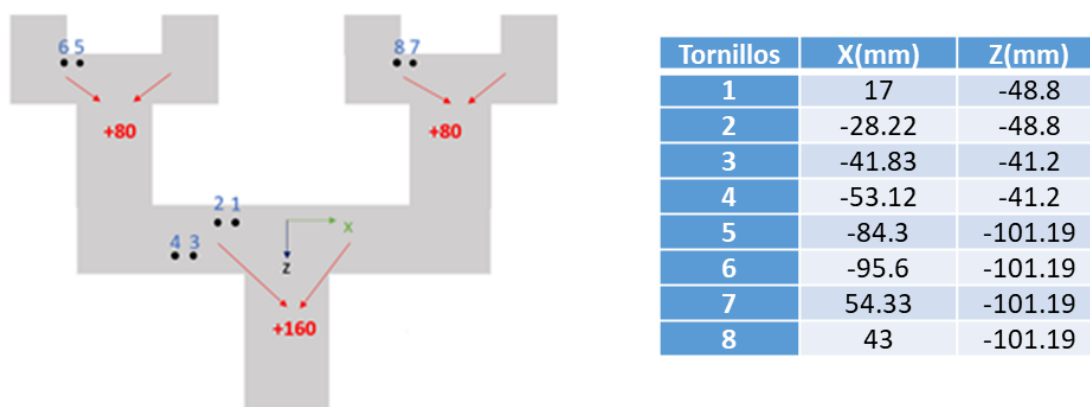


Figura 3.41 Desfases del divisor de cuatro puertos según configuración de tornillos Tabla 3.2

Por tanto, se habría conseguido diseñar un divisor de cuatro puertos, logrando replicar, el diseño empleado en [1] demostrando que la implementación de tornillos produce desfases entre puertos.

3.8 Conclusión

Como conclusión, la estructura que servirá para configurar un array de cuatro elementos arroja una adaptación por debajo de los -18 dB para prácticamente toda la banda de trabajo (véase figura 3.36). A su vez, se puede observar que se reparte la señal de manera prácticamente igual (fura 3.37) con idénticas fases.

Una vez que se introducen los tornillos de fases, se estrecha el ancho de banda de adaptación y empeora la transmisión en cuanto a que aumentan la diferencia de potencias de ésta. Sin embargo, se consiguen desfases de aproximadamente 80 grados progresivos entre puertos.

A diferencia de los resultados obtenidos en [1], en la tecnología gap no se han logrado más configuraciones de desfases.

4 Desarrollo

4.1 Elemento unitario

Una vez obtenido el array de alimentación, la aplicación que se decidió implementar para configurar la red de alimentación fue construir un array de 4 bocinas sectoriales en plano H. Dado que la distancia entre elementos venía ya acotada por la propia configuración del array de alimentación (fig. 3.35), se decidió que la apertura de la bocina fuese lo más cercana posible a la distancia entre centros de los distintos puertos de la estructura de la figura 3.35.

Los resultados teóricos de la radiación de la bocina sectoriales en plano H son los siguientes:

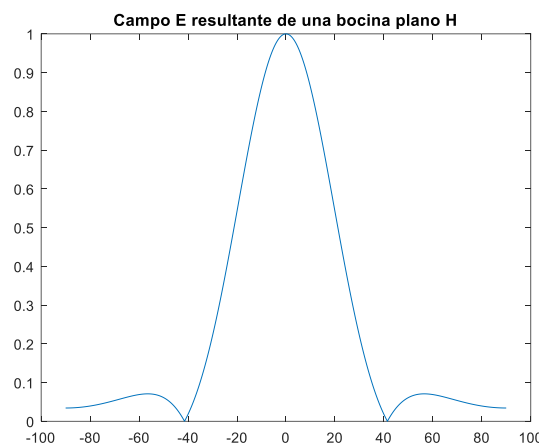


Figura 4.1 Diagrama de radiación teórico del elemento unitario

Donde la distancia entre elementos y la apertura son iguales, y exactamente 72 mm. Para implementarlo, emplearemos la tecnología “convencional” de guía de onda y la tecnología gap, de manera que se pueda hacer una comparación entre las dos configuraciones.

4.1.1 Bocina Normal

Para poder obtener la bocina óptima que asegure el mínimo error de fase, como ya estaba prefijada la apertura óptima (A_{opt}), fue necesario por tanto despejar de (for. 2.5) el parámetro R1.

El problema remanente era que el parámetro R1 consistía en la distancia entre el centro focal de la guía, y dado que buscar el centro focal dentro de una guía es una labor costosa, se procedió, mediante cálculos geométricos de la estructura, a calcular el L_H , que consiste en la distancia entre la guía como tal y el principio de la apertura óptima.

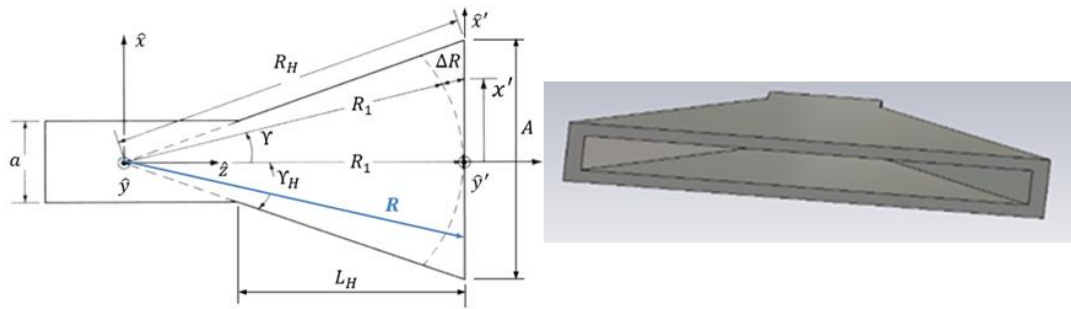


Figura 4.2 Parámetros de una bocina de plano H teórico y en CST

Siendo la imagen derecha de la figura 4.2, la resultante del diseño en CST. Su parámetro S11(fig 4.3) por debajo de -10 dB para toda la banda, un rango de adaptación típico en las bocinas sectoriales en plano H.

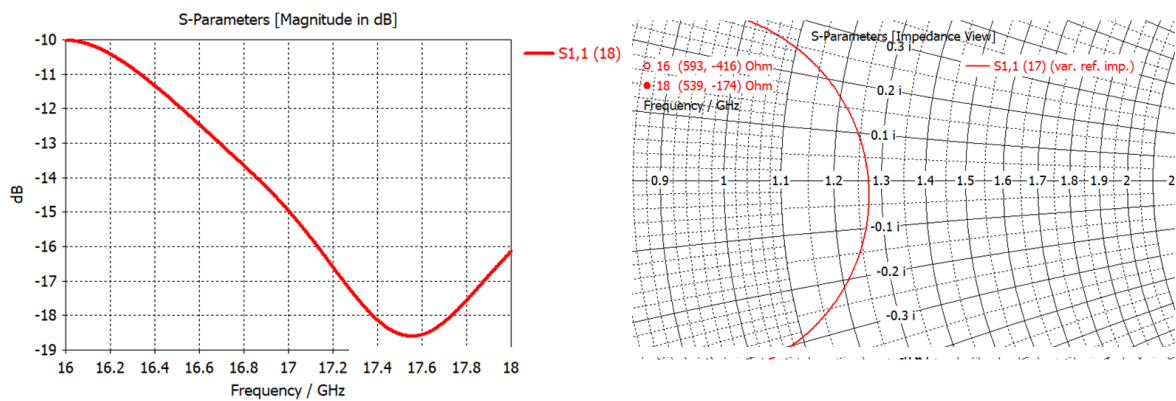


Figura 4.3 Adaptación de la bocina convencional

A continuación, plasmamos los resultados del campo radiante de la bocina implementada, siendo la figura 4.4 la representación del eje cartesiano del plano $\phi=0$, siendo este el plano copolar, donde obtenemos una directividad de 10.5 dBi, apuntando a theta 0 y con un SLL de -12.6 dB.

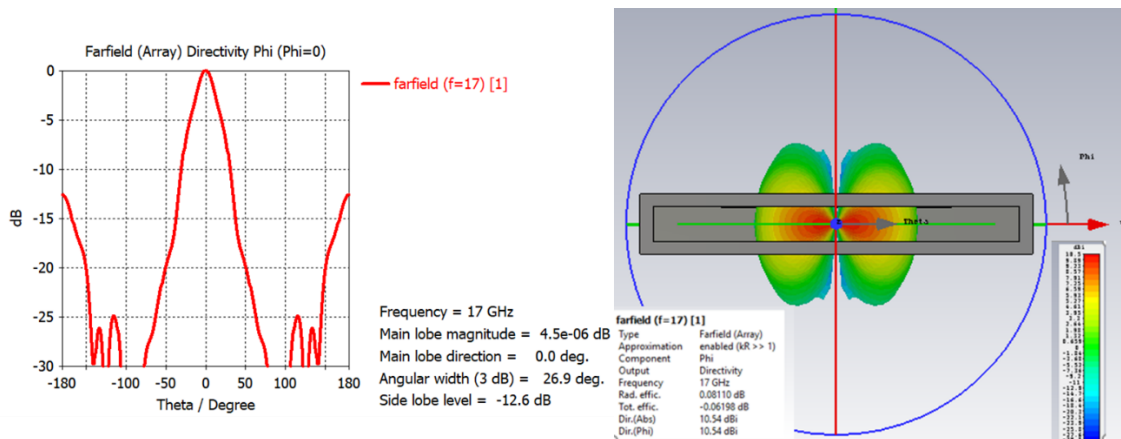


Figura 4.4 Diagrama de radiación de la bocina convencional

4.1.2 Bocina GAP

Una vez obtenidos los resultados de la bocina con tecnología clásica, se implementó la bocina con tecnología gap, manteniendo el mismo L_H que asegure el error de fase óptimo, y exactamente la misma apertura que en la bocina del apartado 4.1.1.

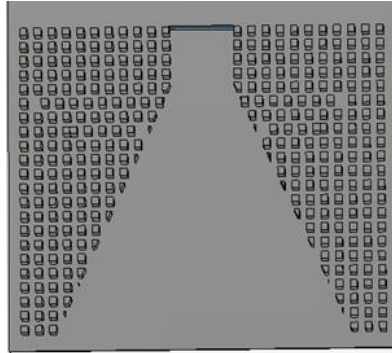


Figura 4.5 Bocina Gap

Obtenemos parámetros S similares a los de la figura 4.3, aunque con una respuesta para la frecuencia de trabajo peor que la implementada con tecnología clásica.

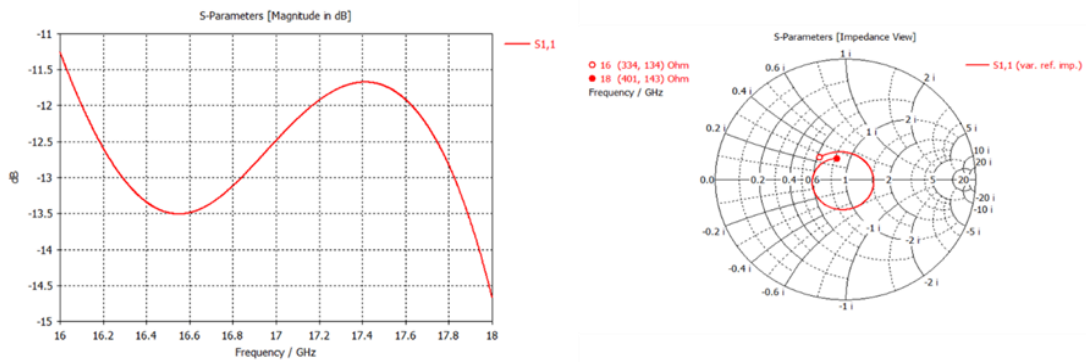


Figura 4.6 Adaptación de la bocina gap

En cuanto al plano de la radiación copolar, que sigue siendo la $\phi=0$, encontramos que tiene el haz más estrecho que el de la fig 4.4, con los lóbulos secundarios (SLL) 2 dB más altos (10.6) y una directividad de 11.1 frente a la directividad de 10.6 de la boc. clásica.

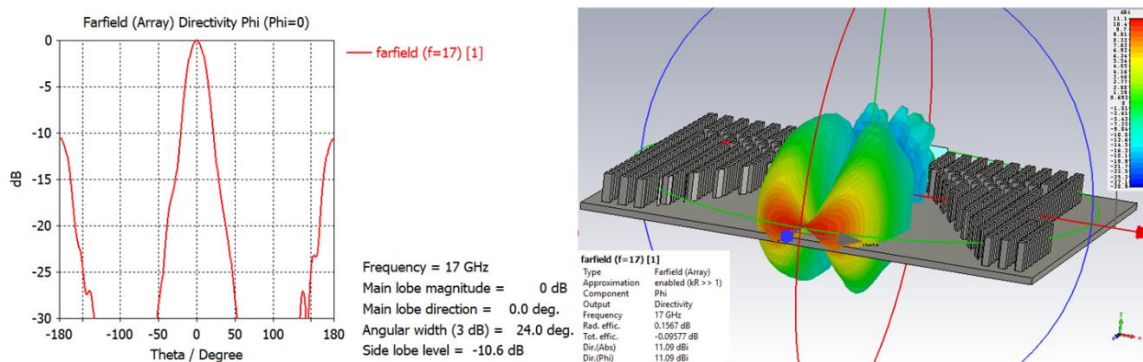


Figura 4.7 Diagrama de radiación de la bocina GAP

4.1.3 Comparación entre Bocinas

La diferencia entre ambas bocinas es la siguiente:

Adaptación

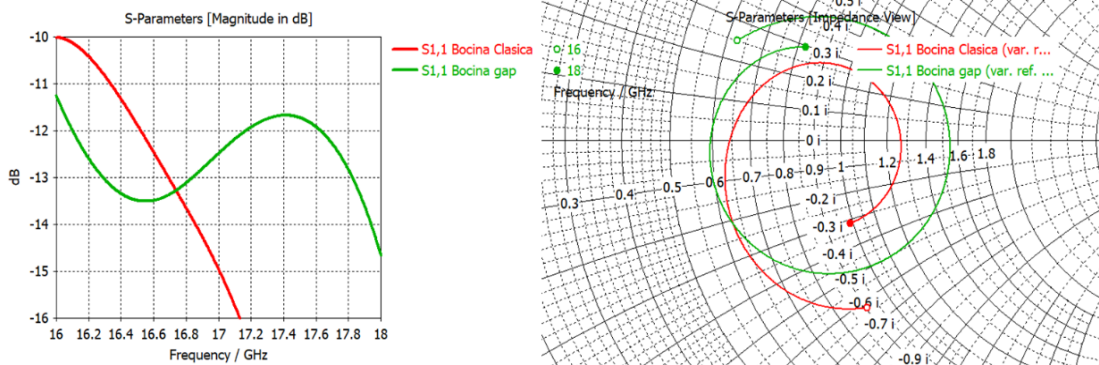


Figura 4.8 Comparativa de la adaptación entre bocina GAP y convencional

Directividad y

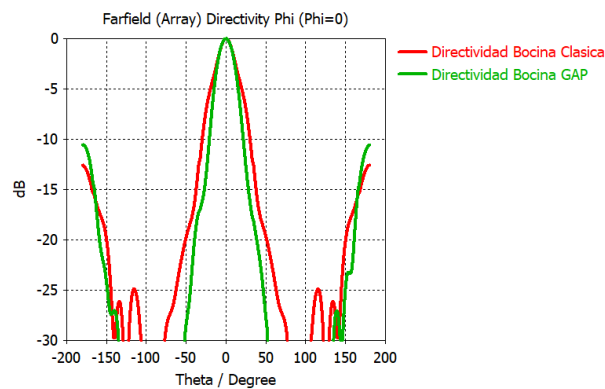


Figura 4.9 Comparativa entre directividad

4.2 Factor de Array

Estando ya implementado el elemento unitario, se procede al diseño teórico del array de 4 bocinas.

Como ya se ha visto en el apartado 2.1.3.1, el campo E resultante es el resultado de multiplicar el elemento unitario por el factor de array, siendo, por tanto, teóricamente estos los resultados:

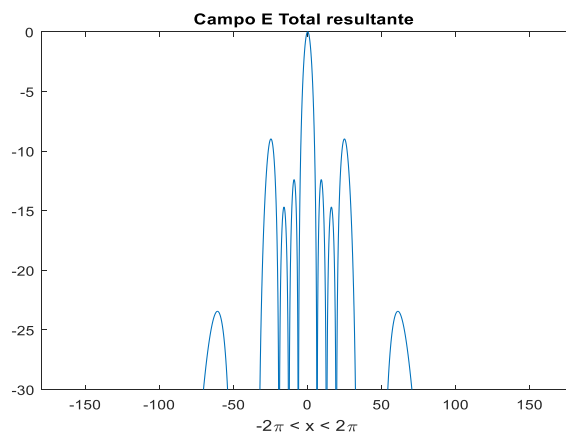
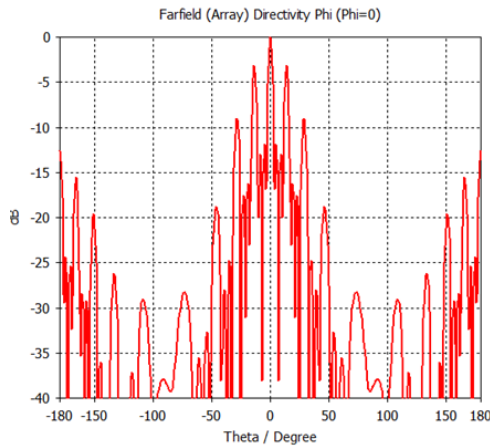


Figura 4.10: Diagrama de radiación total teórico

Se observa que el factor de array estrecha el ancho de haz, aumentando a su vez los lóbulos secundarios (SLL), empeorando notablemente la transmisión. Dicho empeoramiento sucede debido a que la distancia entre elementos, la cual viene determinada por la dimensión mínima para añadir los tornillos de ajuste de fase, es más de cuatro veces superior a la distancia de λ (en concreto la distancia entre elementos es de 72 mm, exactamente 4,23 veces λ).

Bocina normal



Bocina Gap

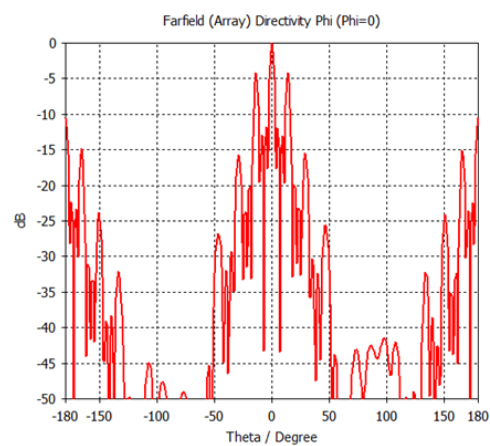


Figura 4.11 Array de cuatro bocinas convencionales 4.12 Array de cuatro bocinas GAP

Dado que las SLLs obtenidas son excesivamente grande para una correcta radiación, se procedió a implementar en el apartado 4.4 distintas soluciones.

4.3 Array de alimentación + Elementos Unitarios

4.3.1 Bocinas Clásicas

Una vez formado el divisor de cuatro puertas, se formó un array de cuatro bocinas sectoriales de plano H, como en la fig. 4.13

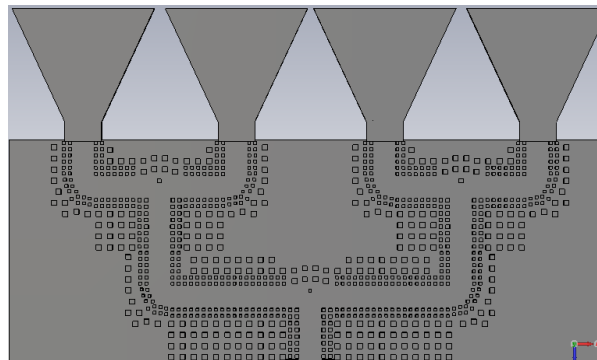


Figura 4.13 Array de cuatro bocinas convencionales

Siendo los parametros S los siguientes

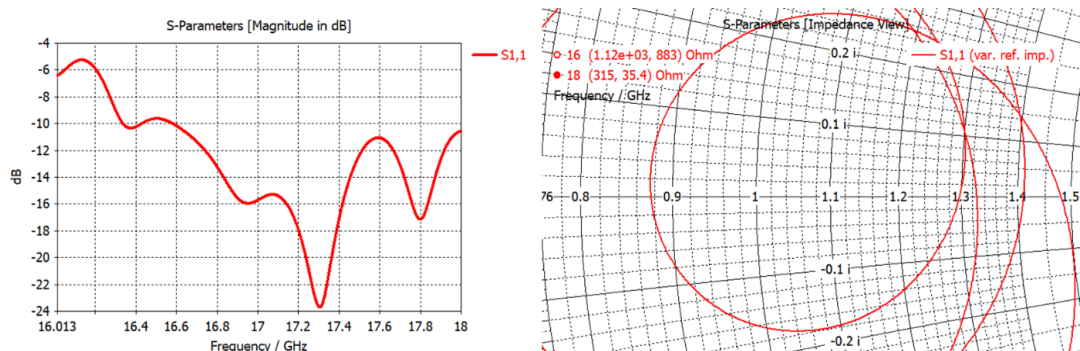


Figura 4.14 Adaptación del array de bocinas convencionales

Y el diagrama de radiación, es el siguiente:

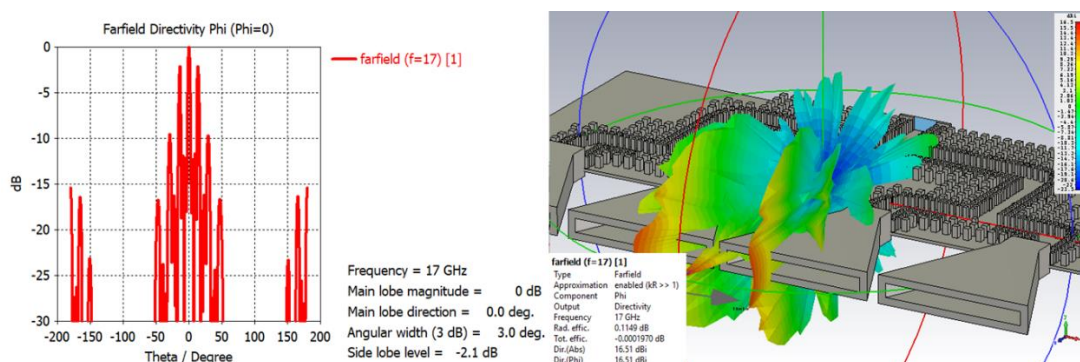


Figura 4.15 Diagrama de radiación de array de bocinas convencionales

El nivel de los SLL es demasiado alto para el correcto funcionamiento del sistema, siendo de tan solo de -2 dB, el cual impide una correcta radiación.

4.3.2 Bocinas GAP

Al igual que en el caso anterior, se procedió a implementar el array de bocinas empleando la configuración de bocinas gap (apartado 4.1.2).

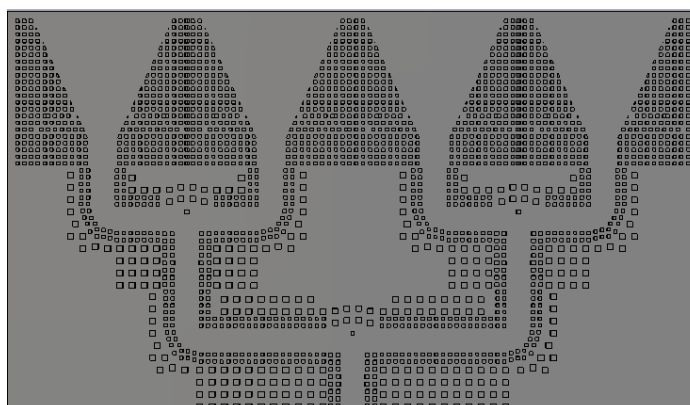


Figura 4.16 Array de bocinas GAP

Siendo su parámetro S de adaptación el siguiente:

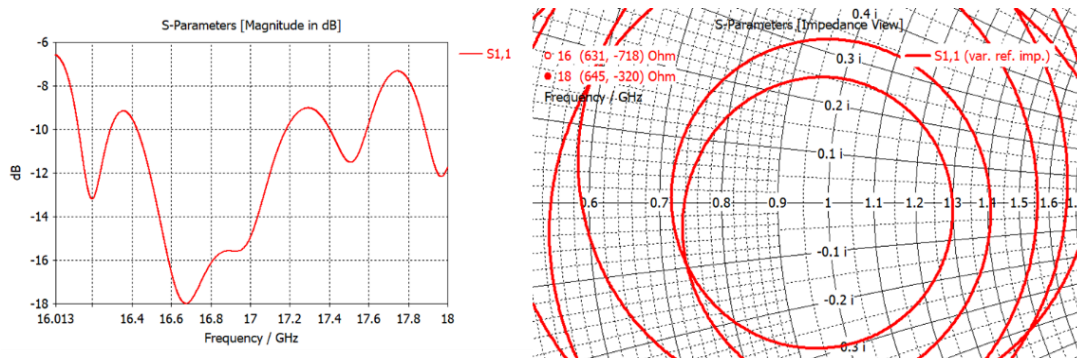


Figura 4.17 Adaptación array de bocinas GAP

Y siendo su diagrama de radiación el siguiente:

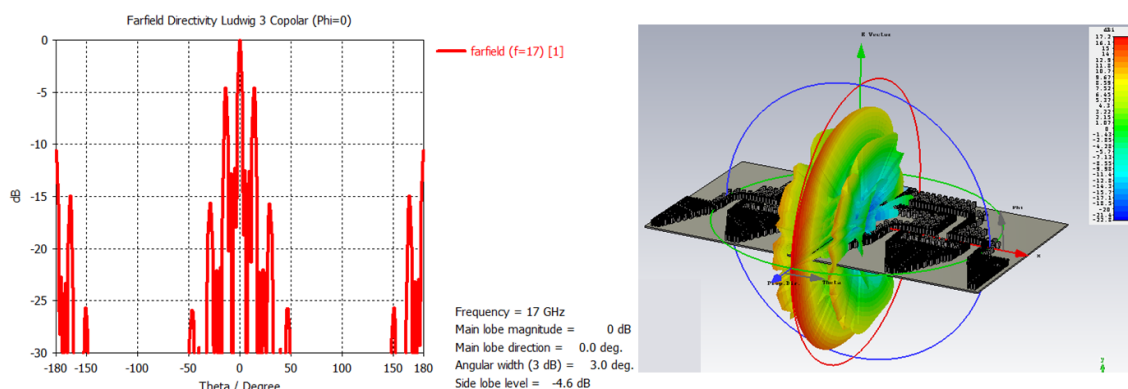


Figura 4.18 Diagrama de radiación del array de bocinas gap

4.4 Soluciones para el problema de los Grating Lobes

4.4.1 Lente de dieléctrico

La primera solución estudiada para mejorar los grating lobes fue la implementación de una lente de dieléctrico, que se disponía de manera que se introducían 5 mm en el interior de la apertura de la bocina y 20 mm que sobresalían de esta. La lente funciona de manera que concentraba el haz de la radiación, a expensas de perder adaptación de esta. El ϵ del dieléctrico en cuestión que nos ha permitido los siguientes resultados es igual a 2.8.

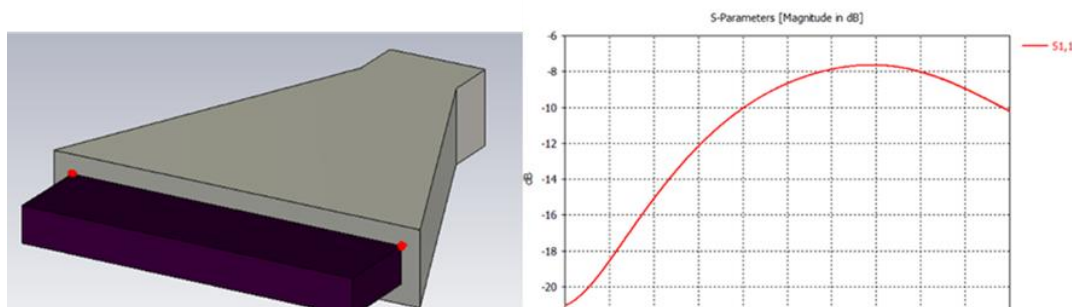


Figura 4.19 Bocina con lente y adaptación

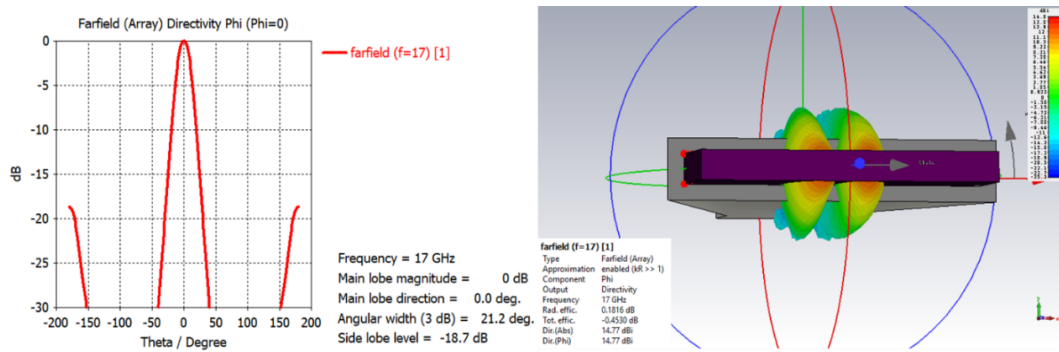


Figura 4.20 Diagrama de radiación de la bocina con la lente de dieléctrico

Siendo su Ganancia y directividad comparada con la bocina sin dielectrico la siguiente:

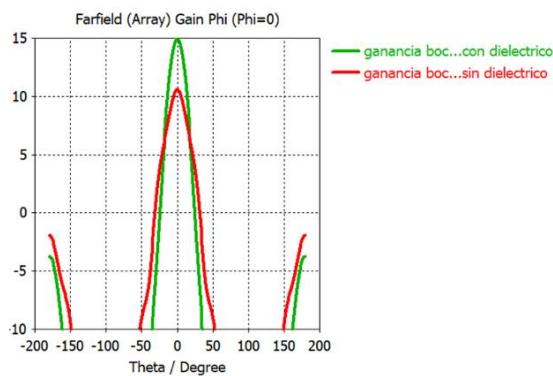


Figura 4.21: Comparativa entre ganancia de la bocina con y sin dieléctrico

El cual al aplicarle el factor de array, obtenemos o siguiente:

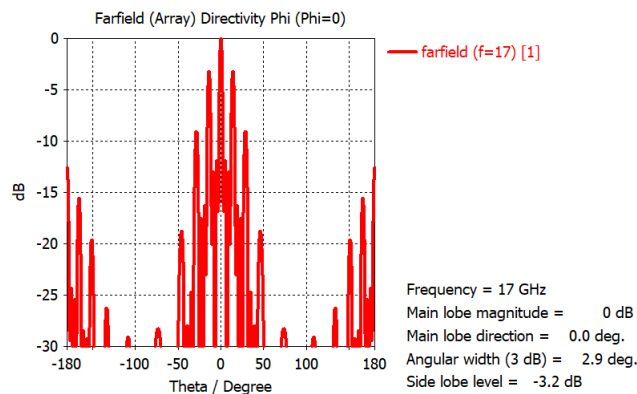


Figura 4.22 Factor de array de bocina con lente

Aunque ha aumentado la directividad, se ha estrechado el haz y han disminuido los SLL, sigue teniendo un SLL de -5.2 dB, demasiado alto para una correcta radiación.

4.4.2 Array apilado en Y

Dado que la lente mejoraba notablemente la directividad y la SLL de la bocina como tal, pero que, al aplicar el factor de array, el SLL sigue siendo demasiado alto, se hace necesario el uso de una segunda solución para dicho problema. Se determinó por tanto que la solución fuese diseñar un array apilado en y de las cuatro bocinas con la configuración de la figura 4.23



Figura 4.23 Array de bocinas apilado en y

Una posible solución consiste en formar un array de 4 capas apiladas sobre si en y, de manera que la capa 1 y la capa 3 estan alineadas respecto a y mientras que la capa 2 y la capa 4 estan desplazadas 36 mm respecto a estas en x, y alieneadas entre si. De esta manera, el haz se estrecha, aumenta considerablemente la directividad y decaen los grating lobes que anteriormente dificultaban considerablemente la radiación.

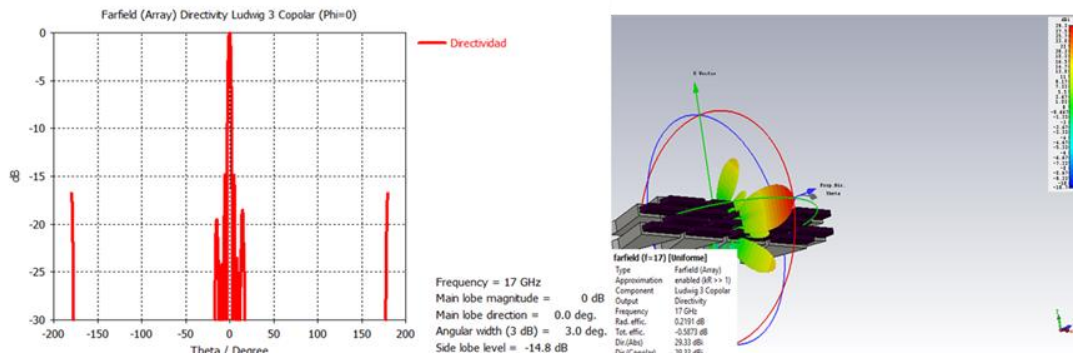


Figura 4.24 Diagrama de radiación del array apilado en y

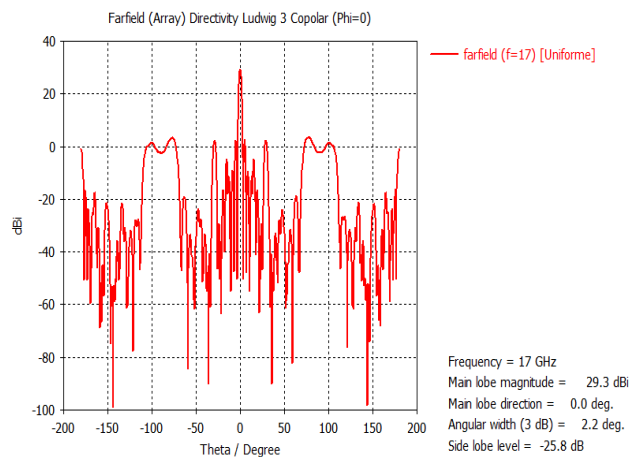


Figura 4.25 Ganancia en plano phi=55 grados

Si se apila el array con la estructura de la figura 4.23 se consigue que el array resultante tenga una SLL inferior a -15 dB para el plano phi=0, lo cual conseguiría diseñado funcionase, obteniendo una radiación con una ganancia 25 dB y unos lobulos secundarios totalmente inferiores, dando así, pleno sentido al diseño.

5 Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

Como resultado del estudio realizado se ha podido constatar las ventajas de la tecnología gap, que consiste en la posibilidad de diseñar estructuras sin necesidad de que exista contacto físico entre las placas que conforman la guía.

Observando los resultados obtenidos en adaptación, transmisión y fase de las distintas estructuras analizadas y en concreto del divisor de cuatro puertas que alimenta el array, se ha podido analizar que su funcionamiento es muy similar al de las guías de tecnología convencional. Si bien a 17 GHz las diferencias son sutiles entre el uso de la tecnología GAP y de la tecnología convencional, el estudio sirve como aproximación del funcionamiento de la tecnología gap a frecuencias superiores (mayores de 20 GHz) donde las diferencias deberían de ser mucho más significativas en favor de la tecnología GAP.

En cuanto al funcionamiento de los tornillos de sintonía se han encontrado bastantes cuestiones. La presencia de tornillos supone un desfase frente a la guía que no los presente, permitiendo cumplir uno de los objetivos de este trabajo que es poder diseñar divisores con desfase entre las salidas. Pero a su vez, la presencia de tornillos empeora la adaptación de la estructura, estrechándose el ancho de banda; también la distancia mínima entre tornillos ha ido determinando la longitud mínima de los divisores, limitando por ello la distancia a la que se encontraran los elementos conformantes del array, afectando a la radiación, empeorando y complicando el diseño, dado que la distancia era bastante superior a la λ de éste. En el apartado 4.4 de este trabajo se plasmaron soluciones teóricas a este problema.

5.2 Trabajo futuro

Como se ha visto en el apartado 4.4.2, una continuación idónea sería el diseño del array ampliado en y , y desplazado en x como en la figura 4.23 para obtener los diagramas de radiación de la figura 4.24, el cual arroja unos resultados óptimos.

Otras posibles continuaciones, sería el diseño de otro tipo de arrays, con elementos unitarios con SLL inferiores, el diseño de arrays de diferentes números de elementos o el diseño de desfases diferentes mediante configuraciones de tornillos diferentes.

Finalmente, queda abierta el empleo de otro tipo de estructuras o el rediseño de la estructuras de la figura 3.35 de manera que la distancia entre elementos fuese menor arreglando el problema que presenta los arrays de la figuras 4.13 y 4.16.

Referencias

- [1] Raquel Villena, “Diseño de arrays de antenas reconfigurables alimentados por redes corporativas en guía de onda con tornillos de ajuste”, RFCAS –EPS-UAM, Madrid, España, 2017.
- [2] Irene Villar Gómara, “Investigación y aplicación de la tecnología gap waveguide a redes de alimentación para antenas en banda Ku”, RFCAS –EPS-UAM, Madrid, España, 2018.
- [3] P. S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, and E. Rajo-Iglesias, "Local Metamaterial-Based Waveguides in Gaps Between Parallel Metal Plates," *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 8, pp. 84-87, 2009.
- [4] P. S. Kildal, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso, and A. Valero-Nogueira, "Design and experimental verification of ridge gap waveguide in bed of nails for parallel-plate mode suppression," *Microwaves, Antennas & Propagation, IET*, vol. 5, pp. 262-270, 2011.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4^a ed., John Wiley & Sons, 2011.
- [6] Balanis, C.A., “Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition”. John Wiley & Sons Inc, 2005
- [7] P. S. Kildal, "Artificially soft and hard surfaces in electromagnetics," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, no. 10, pp. 1537-1544, Oct 1990
- [8] S. Maci and P. S. Kildal, "Hard and soft surfaces realized by FSS printed on a grounded dielectric slab," *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*, 2004., 2004, pp. 285-288 Vol.1.

Glosario

<i>Array</i>	Traducción de “conjuntos” en inglés.
dB	Decibelio. Unidad para expresar la relación entre dos valores.
CST	Siglas programa: <i>Computer Simulation Technology</i> .
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> .
RF	Radiofrecuencia.
RFCAS	grupo RFCAS (Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas).
TFG	Trabajo de Fin de Grado.
λ_0	Longitud de onda en el vacío.

Anexos

A Guía de Onda GAP

- **B.1.1 Guía de onda 3 pines**

En este apartado se estudia el efecto del diseño gap en tecnologías de guía de onda rectangulares clásicas y posteriormente, analizar la inclusión de los tornillos de ajuste de fase, analizando el efecto que tiene desplazarlos sobre la guía de onda y el efecto de acercarlos o alejarlos de la pared de pines. Para este diseño empleamos pines clásicos diseñados en [2], de anchura de pin (w) de 2.5 mm y una distancia entre centros de pines (p) de 5.3 mm.

1. Guía de onda a 3 hileras de pines

La guía de onda de la figura A.1 se corresponde a una guía rectangular de anchura (a) de 11 mm y una altura (b) de 5.5 mm.:

a. Características sin pines

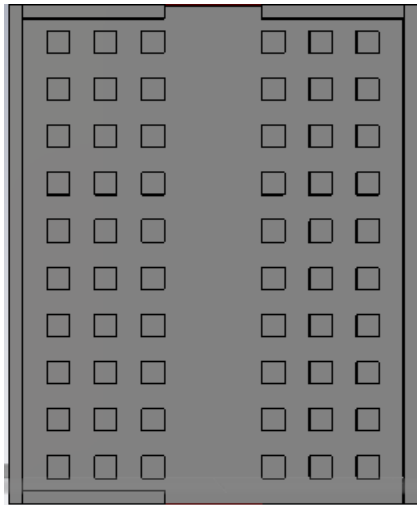


Figura A.1 Guía Rectangular de hilera de 3 pines

Para esta configuración, se ha procedido a emplear tres hileras de pines, puesto que a partir de tres hileras de pines el comportamiento de la gap es prácticamente el ideal, permitiendo así el máximo posible de transmisión de la puerta de entrada de la guía a la de salida. A través de este estudio plasmaremos primero los parámetros S de adaptación y de transmisión de la guía con tecnología gap waveguide sola, de manera que se pueda comparar con los efectos que introducen los tornillos.

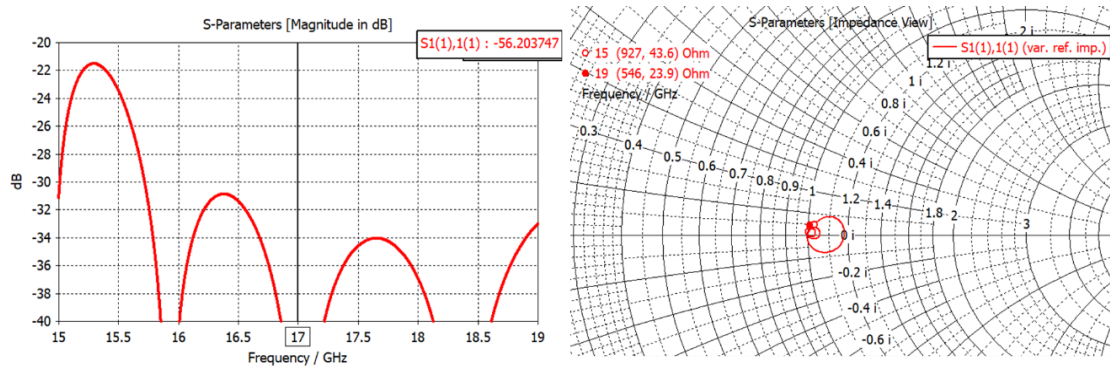


Figura A.2 Adaptación en amplitud y carta de Schmitt

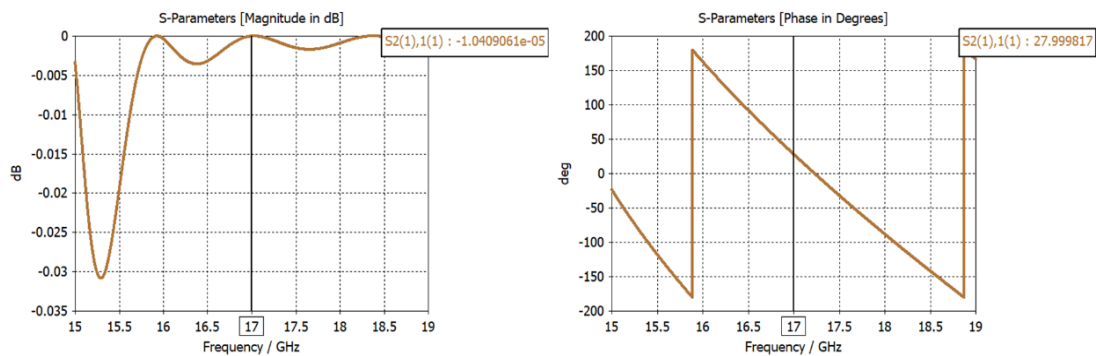


Figura A.3 Transmisión en amplitud (izq) y fase (der)

Podemos observar, que con tres hileras se asegura una adaptación prácticamente perfecta presentando a su vez, una transmisión prácticamente completa, con una fase de 27 grados.

b. Tornillos de ajuste de fase en guía de hilera de tres pines

Ahora procederemos a introducirle los tornillos, variando la distancia entre ellos y desplazándolos de distintas formas a lo largo de la guía, para mostrar los resultados que se obtienen tras ello.

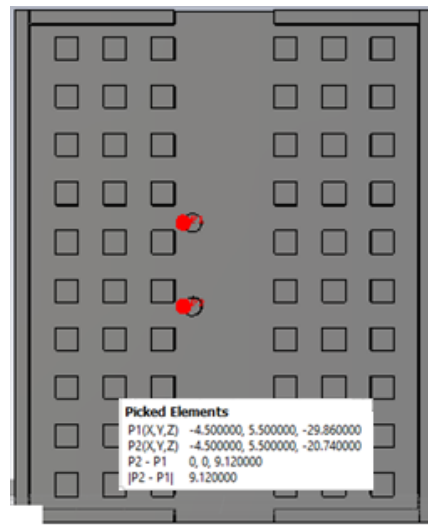


Figura A.4 Guía rectangular con tornillos

Diámetro tornillos: 2mm

c. Variando distancia a la pared y fijando como distancia canon 9.63

Primero procedemos variando la distancia entre pines para poder observar cual es el efecto que esta tiene en los parámetros S. Nuestro principal objetivo era observar los desfases que se establecían en la transmisión, pero tratando de conseguir la mejor adaptación posible.

Distancias fijas y cánones a lo largo del estudio:

-Distancia a la pared: 0.7 mm

-Posición en la guía: [-15 , -40]

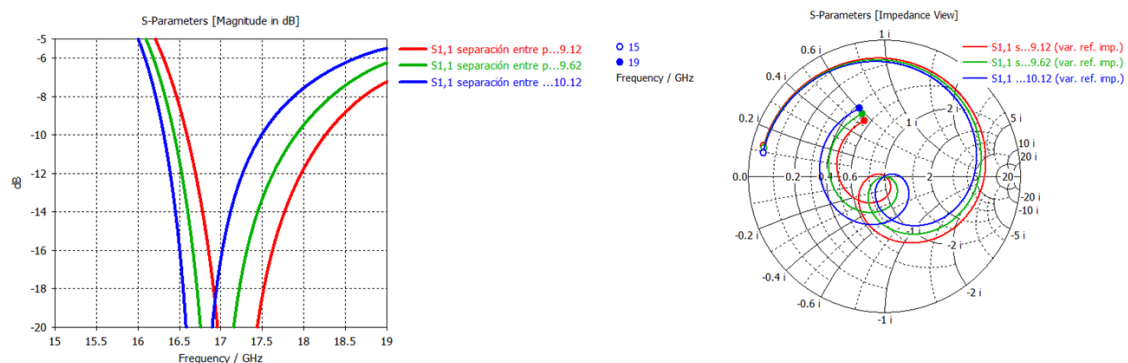


Figura A.5 Variación de la adaptación en amplitud (izq) y carta d Schmitt (der) tras variación de separación entre tornillos

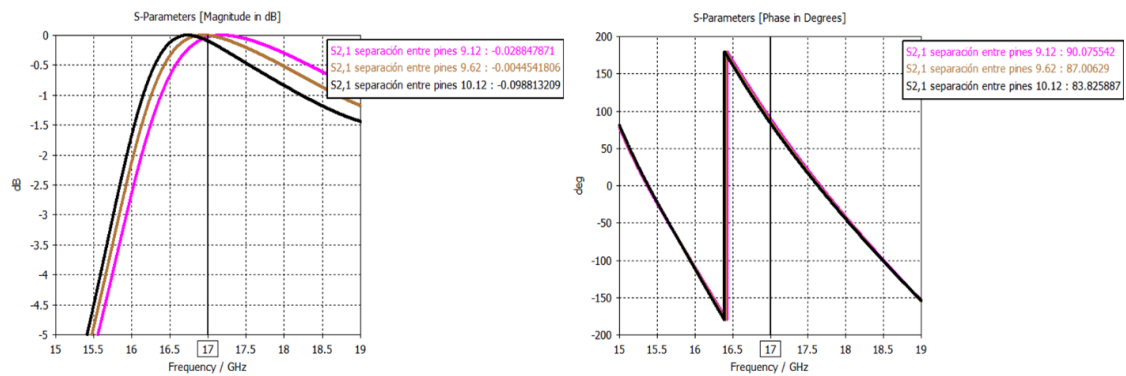


Figura A.6 Variación de la transmisión en amplitud (izq) y fase (der) tras variación de separación entre tornillos

Podemos observar que la introducción de tornillos supone una pérdida de ancho de banda, dado que se estrecha, de manera que también se verá afectada la transmisión.

Tras variar la distancia entre pines, podemos observar que afecta fuertemente a la adaptación (S₁₁), de manera que variar la distancia entre pines ayuda a desplazar en el eje de frecuencias el ancho de banda de adaptación. Es decir, ajustando la distancia entre pines no aumentamos la adaptación en sí pero si conseguimos “centrar” a la frecuencia de diseño requerida.

Sin embargo, no afecta significativamente a la amplitud de la transmisión, consiguiéndose una variación de unos 7 grados. Se consigue, por tanto, un desfase de entre 55 grados y 62 grados.

d. Variando distancia a la pared y fijando como distancia canon 9.63

Procedemos ahora a variar la distancia a la que están los tornillos de la pared configurada por la ristra de pines que configuran la gap waveguide, fijando la distancia entre pines a 9,63 mm.

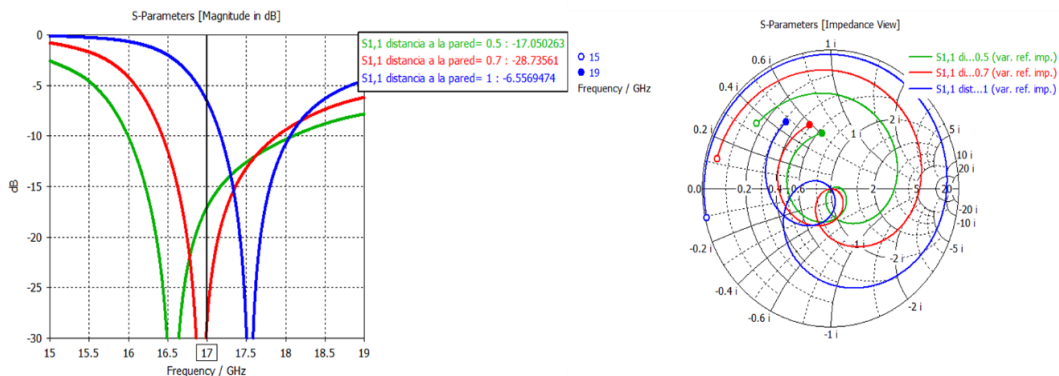


Figura A.7 Variación de la adaptación en amplitud (izq) y carta de Schmitt (der) tras variación de distancia a la pared de pines

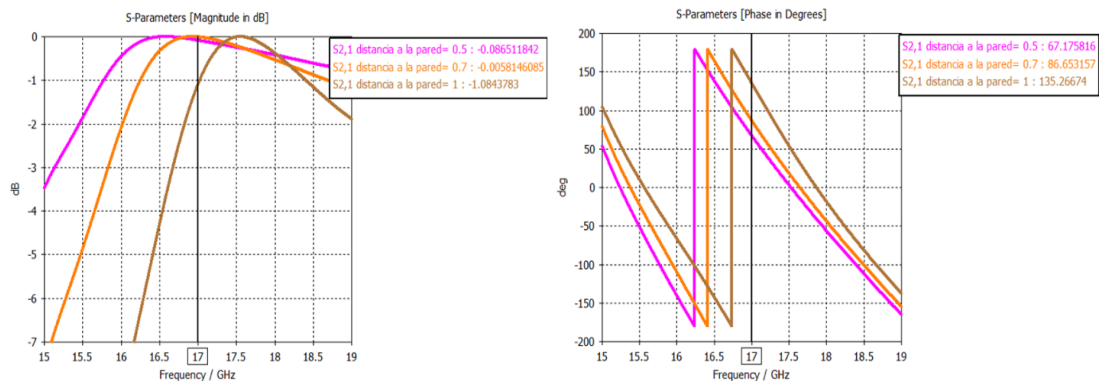


Figura A.7 Variación de la Transmisión en amplitud (izq) y fase (der) tras variación de distancia a la pared de pines

Podemos observar que variar la distancia entre pines afecta al ancho de banda de la adaptación (S_{11}), ampliándola y desplazándola a medida que se acerca a la pared de la guía configurada por los pines.

Estas variaciones afectan tanto a la amplitud de la transmisión como a su fase. La amplitud se estrecha a medida que se aleja de la pared, mientras que la fase recibe grandes variaciones, siendo mayores cuanto más se acerca a la pared de pines

Tras los diferentes análisis, observamos:

- 1) Variar la distancia entre ellos no varía prácticamente la fase de transmisión, pero si la adaptación, permitiéndonos mover la resonancia a lo largo de frecuencia
- 2) Acercar los pines a la pared permite tener mejor adaptación, pero menos desfase, y alejarlos a la inversa.

Por todo ello tomamos como valor nominal para 3 hileras de pines y dos tornillos el de distancia con el cual se consigue un desfase de 58~60 grados.

2. Guía de onda a 2 hileras de pines 437

En muchas ocasiones, por cuestiones de espacio, se requiere usar un conjunto de pines más finos y con una separación menor entre ellos, sin que este cambio afecte notablemente al funcionamiento correcto de la guía. Es por ello, que, en el diseño de la T, y de las siguientes estructuras se emplean pines 437, con un ancho de 1,435 mm y una separación entre pines de 2.935 mm.

Por ello, plasmamos los resultados que se obtienen de una guía con las mismas dimensiones que las anteriores, con las paredes de las guías

conformadas por los pines 437, y posteriormente, el resultado de los efectos de los tornillos en esta guía, de manera análoga a como hicimos en el caso anterior.

a. Características sin pines

La guía de onda de la figura A.7 se corresponde a una guía rectangular de anchura (a) de 11 mm y una altura (b) de 5.5 mm. :

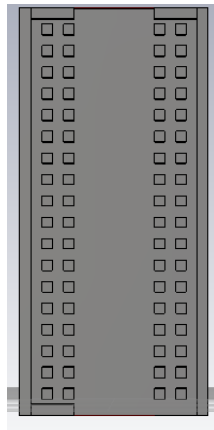


Figura A.8 Guía Rectangular de hilera de 2 pines 437

A continuación, sus valores de S11 y S12

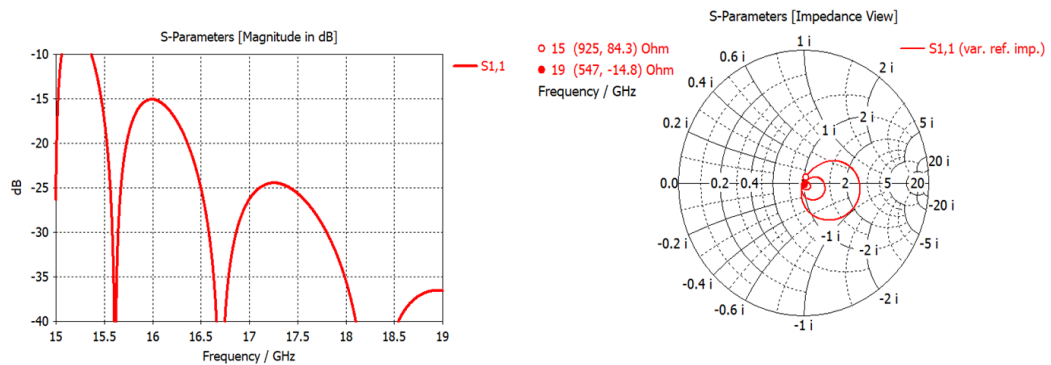


Figura A.9 Adaptación de la guía de 2 hileras en amplitud (izq) y carta de Schmitt (der)

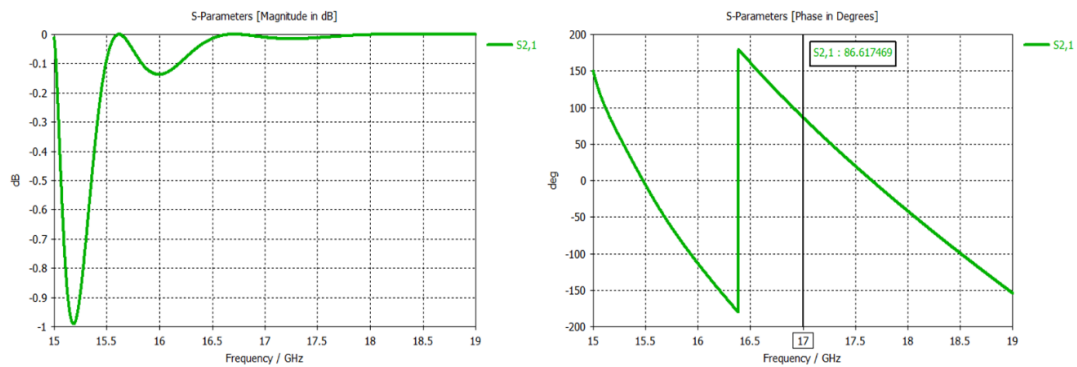


Figura A.10 Transmisión de la guía de 2 hileras en amplitud(izq) y fase(der)

Podemos observar, que la adaptación de la guía con pines 437 es inferior a la de tres hileras con pines “normales”, no consiguiendo un ancho de banda por debajo de los - dBs como en el caso anterior. En cuanto a la transmisión, dado que la adaptación empeora, en torno a los 15 GHz encontramos una transmisión de -1 DB en modulo. Sin embargo, no se ven cambios apreciables en la fase.

b. Hilera dos pines 437 con tornillos de ajuste de fase

Ahora procederemos a introducir los tornillos de ajuste de fase para hacer un estudio de su efecto en este tipo de guías.

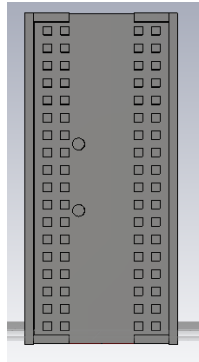


Figura A.11 Guía rectangular con tornillos

c. Variando distancia entre pines

Al igual que en el caso de las guías formada por tres pares de pines, la introducción de los tornillos de ajuste de fase estrecha la adaptación de la señal, reduciendo y empeorando notablemente la amplitud de la adaptación y la transmisión.

A su vez, analógicamente con el caso anterior, variar la distancia entre tornillos permite desplazar la adaptación de la guía, de manera que se puede centrar en la frecuencia de trabajo estipulada.

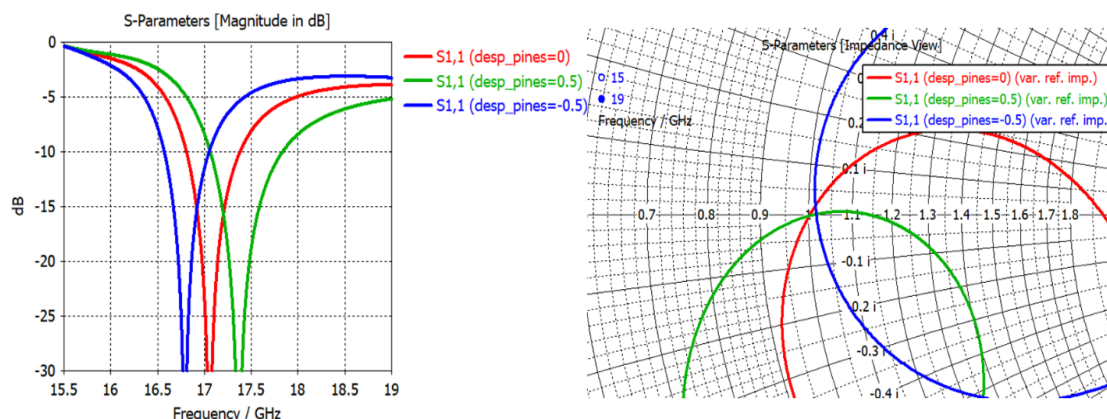


Figura A.11 Variación de la adaptación en amplitud (izq) y carta de Schmitt (der) tras variación de separación entre tornillos

Debido al empeoramiento de la adaptación, la transmisión decae a medida que se aleja de la frecuencia central (en amplitud).

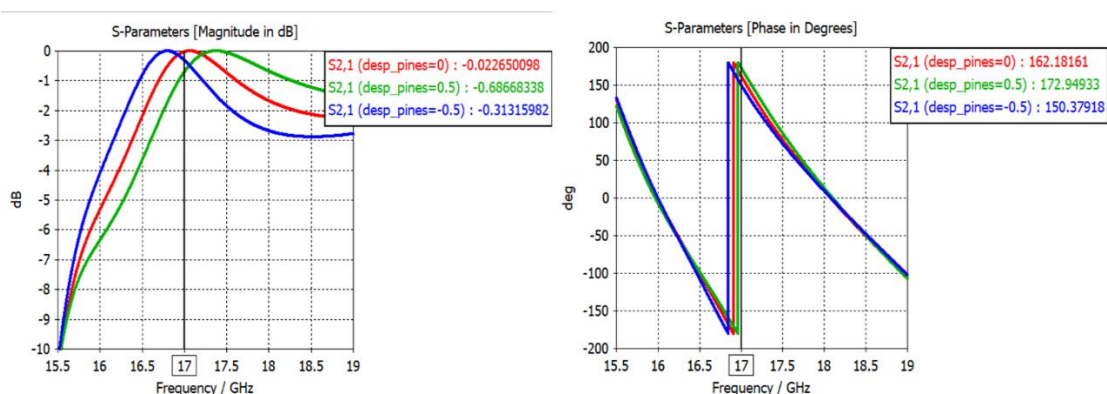


Figura A.12 Variación de la transmisión en amplitud (izq) y fase (der) tras variación de separación entre tornillos

La variación en la distancia entre tornillos produce pequeños desfases, siendo estos de 7 grados para una variación de 0.6 mm, siendo mayores estos desajustes en proporción con la variación que los presentados en la guía anterior (presentaba 7 grados de desfase para una variación de 1.2 mm). Esto puede deberse al efecto que tienen los pines 437 en la conformación de la guía.

d. Variando distancia a la pared y fijando como distancia canon 11.2175

Debido a que el diámetro de los tornillos es superior al ancho y la separación que dejan entre vértices adyacentes los pines, se vuelve físicamente inviable que los tornillos se ajusten y se acerquen tanto a la pared de pines como en los casos anteriores, donde la propia configuración de la gap, permitía aproximar los tornillos hasta 1 mm de distancia en el eje x entre la pared y la cara más próxima de los tornillos a esta.

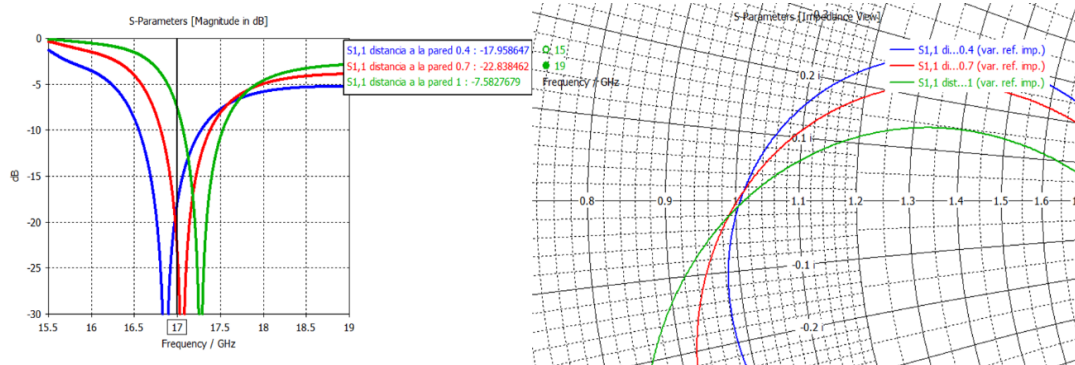


Figura A.13 Variación de la adaptación en amplitud (izq) y carta de Schmitt (der) tras variación de distancia a la pared de pines

De manera muy similar al caso anterior, podemos ver que variar la distancia de los tornillos a la pared de pines resulta en diferentes efectos sobre la adaptación y la transmisión. En el módulo de la adaptación, podemos ver como acercar los tornillos a la pared de pines resulta en un desplazamiento a frecuencias inferiores, y a su vez supone un ensanchamiento del ancho de banda de la adaptación. De manera contraria, cuanto más se alejan los tornillos de la pared de pines, más se desplaza la adaptación a mayores frecuencias y más estrecha se vuelve el ancho de ésta.

Estos efectos se ven reflejados en el módulo de la transmisión, donde a más alejado de la pared de pines esta, peor es la adaptación (encontrando que a 0.95 mm de la pared de pines, para nuestra frecuencia de trabajo, obtenemos una transmisión en dB 0.85 dBs.

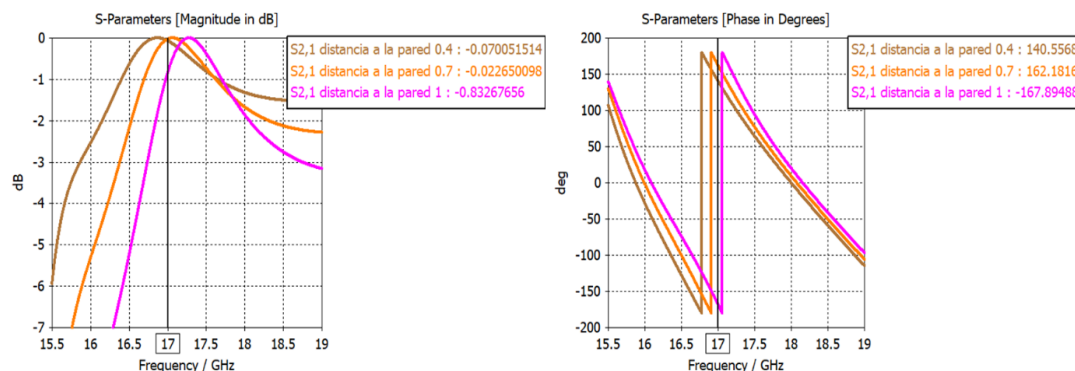


Figura A.14 Variación de la adaptación en amplitud (izq) y carta de Schmitt (der) tras variación de distancia a la pared de pines

En cuanto a la fase, observamos que cuanto más se acercan los tornillos al centro de la guía, mayor es el desfase relativo de esta con respecto a la guía sin tornillos. Por lo tanto, cuando los tornillos están separados 0.35 mm la pared de la guía, obtenemos un desfase de

54 grados, mientras que a 0.95 obtenemos un desfase de 126 grados, es decir, prácticamente el doble.

Tras los diferentes análisis, observamos:

Variar la distancia entre ellos varía más la fase de transmisión que en el ejemplo tres hileras de pines de tamaño normal, consiguiendo una diferencia de 7 en los extremos, y nos permite manipular si la adaptación, permitiéndonos mover la resonancia a lo largo de frecuencia

Acercar los pines a la pared permite tener mejor adaptación, pero menos desfase, y alejarlos a la inversa.

Por lo que cojo como distancia entre pines 11.2175 y como distancia con la pared, 0.65. Obtenemos así, un desfase de 75.56 grados.

B: Divisores

En los siguientes anexos adjuntaremos resultados que por razones de espacio no se han podido incluir en el cuerpo del trabajo. Se adjuntarán los resultados de la variación de diferentes parámetros de los tornillos con el objetivo de justificar los resultados obtenidos.

3. Divisor T de salida

a. Pines Arriba: Desplazamiento de los tornillos a lo largo de la guía

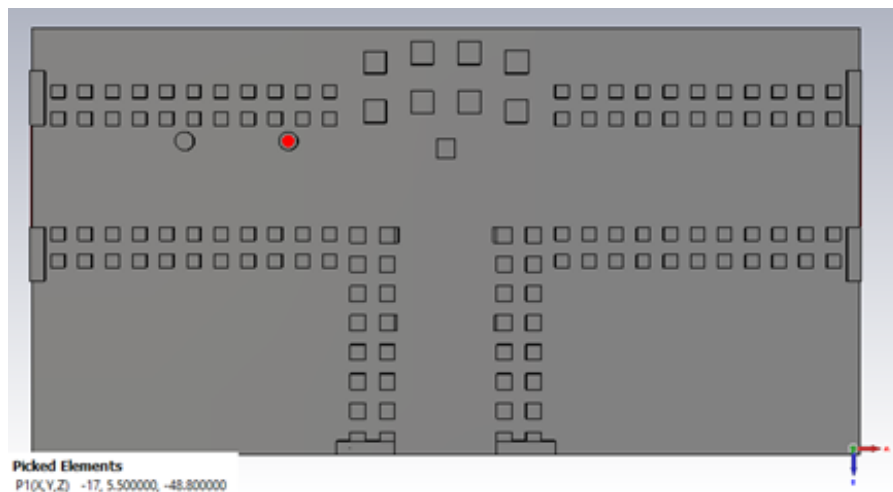


Figura B.1 Divisor en T de salida con dos tornillos

Puesto que ya está fijada la distancia a la cual están los tornillos de la pared de pines de la gap y la distancia entre pines de cada par, se procede a desplazar ambos tornillos sobre el brazo del divisor, de manera que se pueda observar el efecto que esto tiene sobre sus parámetros S. Dado que solo se quiere observar el efecto de desplazar el bloque de pines a lo largo de la guía, pero sin variar la distancia a la pared de pines(sin variar su posición en z), eso implica que los tornillos solo variaran su posición en x . Tomando como 0 la posición central de la guía (el punto centro que separa ambos brazos), procedemos a desplazarla en x . Los resultados obtenidos de este barrido son los siguientes:

:

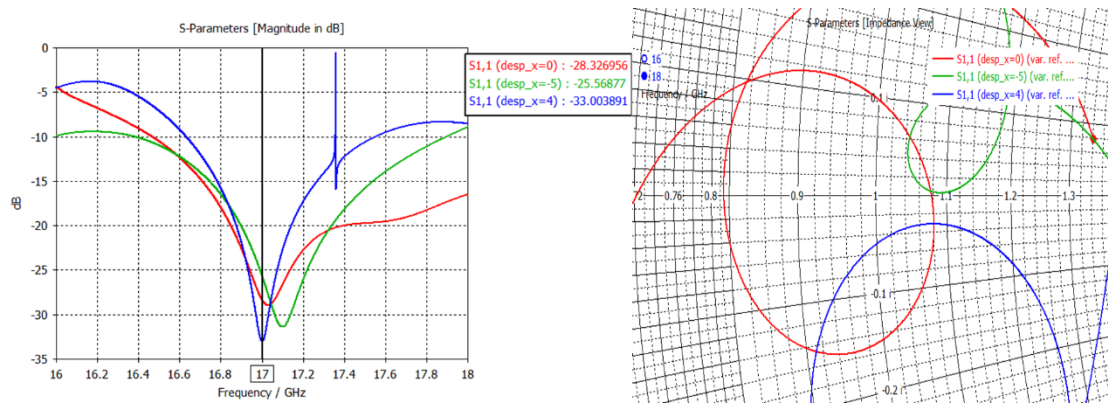


Figura B.2 Variación de la adaptación por el desplazamiento de los tornillos

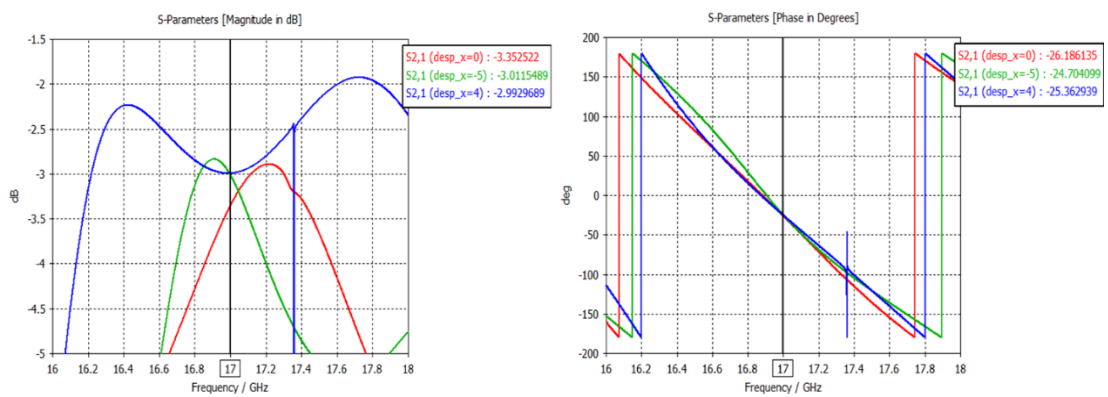


Figura B.3 Variación del parámetro S21 por el desplazamiento de los tornillos

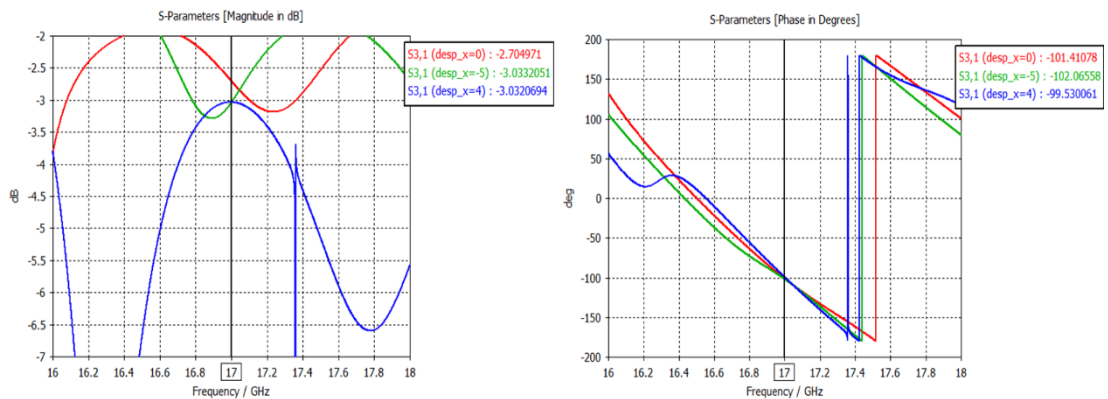


Figura B.4 Variación del parámetro S31 por el desplazamiento de los tornillos

Estando el primer tornillo cuando el desplazamiento en x es = 0 a -17 mm del centro de la guía, cuando se encuentra desplazada a -5 mm el centro del primer tornillo a -22 mm y cuando se encuentra desplazada a 4 mm, el centro del primer tornillo se encuentra a -13 mm.

En cuanto a la adaptación, cuanto más se acerca los pares de pines al centro de la guía, los resultados son más abruptos, y de igual manera para los resultados más alejados al centro de la guía

En cuanto al módulo de ambas transmisiones, podemos observar que hay variaciones, pero que, en la frecuencia de trabajo, las variaciones son muy cercanas entre si y próxima a los -3 dB.

Las fases, excepto en los valores más extremos, son muy cercanas, con un desfase entre sí de 75 grados.

En un compromiso entre desfase y ancho de banda, y a la vista de los resultados, decido que el que mejor se ajusta a nuestras necesidades es aquel en la que no hay desplazamiento, lo que significa que el primer tornillo 17 mm respecto al centro de la guía. Como podemos observar, cuanto más cerca el ancho de banda es peor, y a su vez el desfase es menor (3-4 grados menos): Alejarlo mucho no es conveniente por espacio cuando haya más tornillos y presenta resonancias extrañas y un desfase algo mayor.

Manteniendo así el desfase de 75 grados.

b. Divisor T con pines Abajo: Desplazamiento de pines a lo largo de la guía

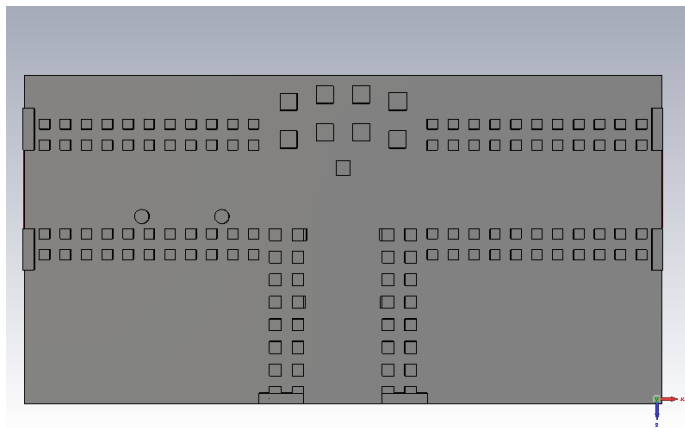


Figura B.5 Divisor T con tornillos en la parte inferior de la guía

El siguiente caso de estudio, consistía en observar si se presentaban cambios en los parámetros S cuando los tornillos de ajuste de fase se encontraban posicionados más cerca de la hilera de pines más cercana a la entrada de la guía. Para hacer un estudio análogo al anterior, se procedió a desplazar el bloque formado por ambos pines a lo largo de la guía.

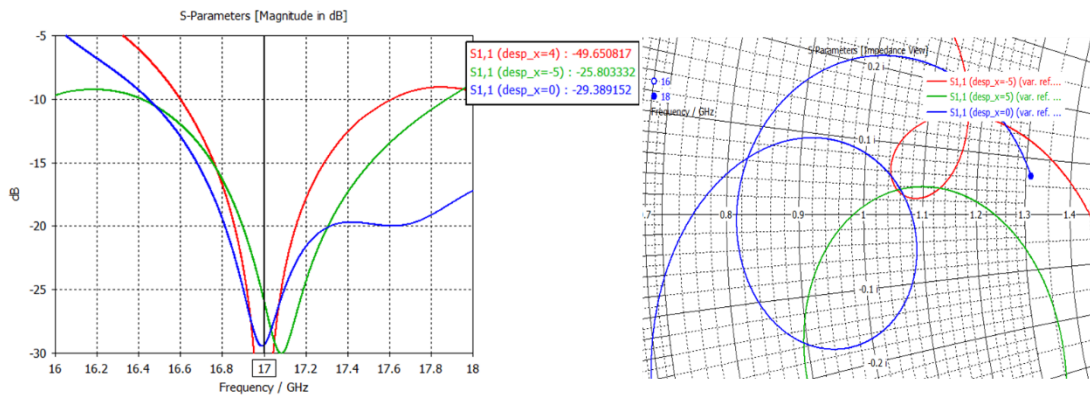


Figura B.6 Adaptación con dos tornillos abajo, variando el desplazamiento en x

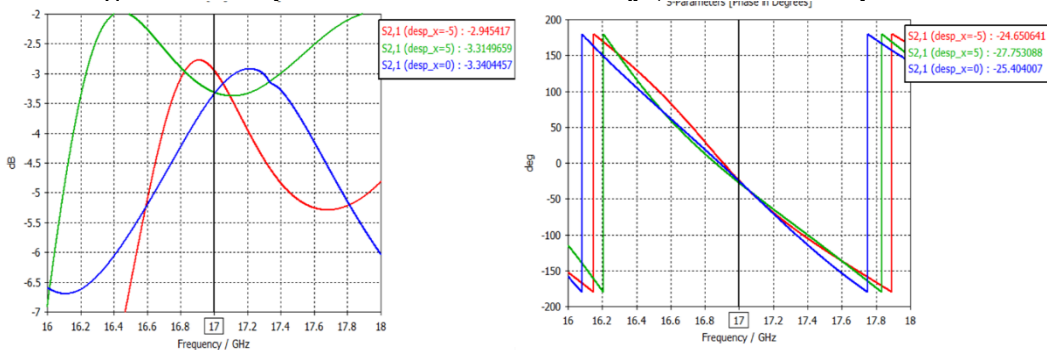


Figura B.7 Variación del parámetro S31 por el desplazamiento de los tornillos

En cuanto a la adaptación, se puede observar que el efecto de desplazarlos a lo largo de x es muy similar al caso en el que el par de tornillos se encuentran en la parte superior de la guía. Al igual que en el caso anterior, el caso en el que mejor ancho de banda se obtiene es cuando el desplazamiento en x es igual a “0”, y el primer tornillo se encuentra a -17 mm del centro de la guía.

En cuanto al desfase producido por los tornillos, si hay diferencias con el caso de la figura 4.8. Mientras que en el caso de la figura 4.8, los desfases producidos frente a la figura 4.9 son muy similares para los casos de desplazamiento en x igual a 0 y -5, en el caso de desplazamiento a x=4 y x=5 son bastante diferentes, encontrando menor desfase cuanto más nos aproximemos a la discontinuidad ofrecida por la separación de ambos brazos de la guía.

A su vez, en los resultados más cercanos al centro de la guía, podemos observar que hay un desfase de 11 grados respecto a cuándo los pines están en la parte más positiva de z de la guía (tornillos abajo)

4. Divisor T de entrada

a. Variación de dos pares de tornillos arriba

Tras ampliar la guía, procedemos al estudio del efecto de dos pares de tornillos sobre los parámetros S en el divisor de potencias tipo T. Para ello, añadimos dos nuevos tornillos a la derecha del primer par (a 15 mm del centro) y a 9 mm de distancia respecto al primer par.

Una vez hecho eso probaremos variando la distancia entre sí, y moviéndolos a lo largo de la guía, recogiendo los resultados que esto tiene sobre la guía.

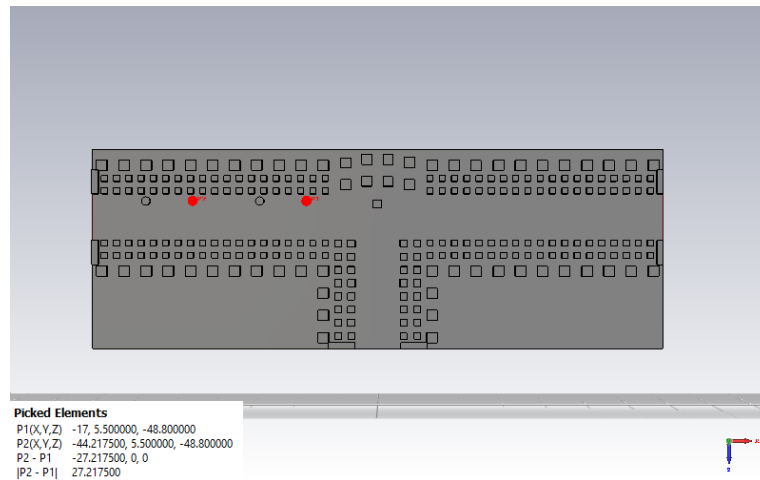


Figura B.8 Divisor T con dos pares de tornillos

Una vez introducidos los dos pares de pines, se presenta una nueva cuestión de estudio, analizar el efecto de la distancia entre ambos pares de pines. En el estudio de las figuras 4.17, 4.18 y 4.19, la separación inicial es de 16 mm entre pines adyacentes(pines 2 y 3 de la figura 3.8), siendo la separación de -5 igual a una separación de 11 mm y la de +5 una separación de 21 mm.

i. Variando la distancia entre si

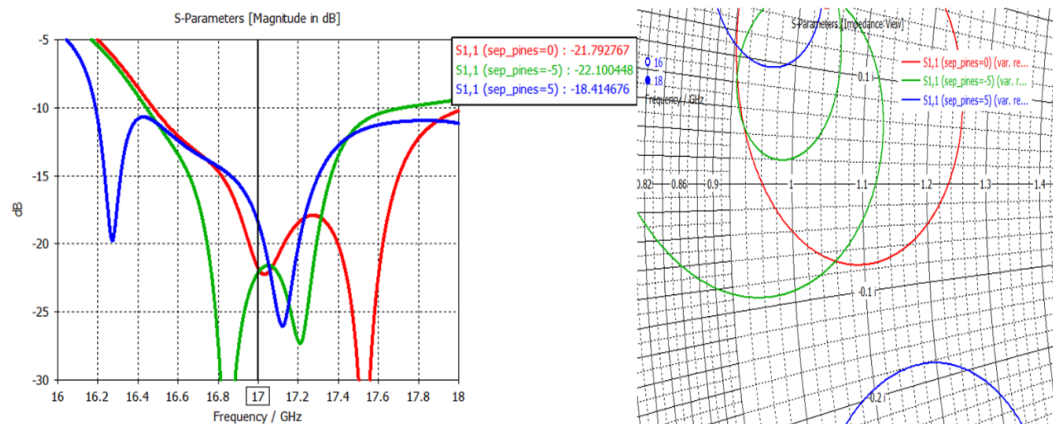


Figura B.9 Variación de la adaptación tras variar distancia entre tornillos

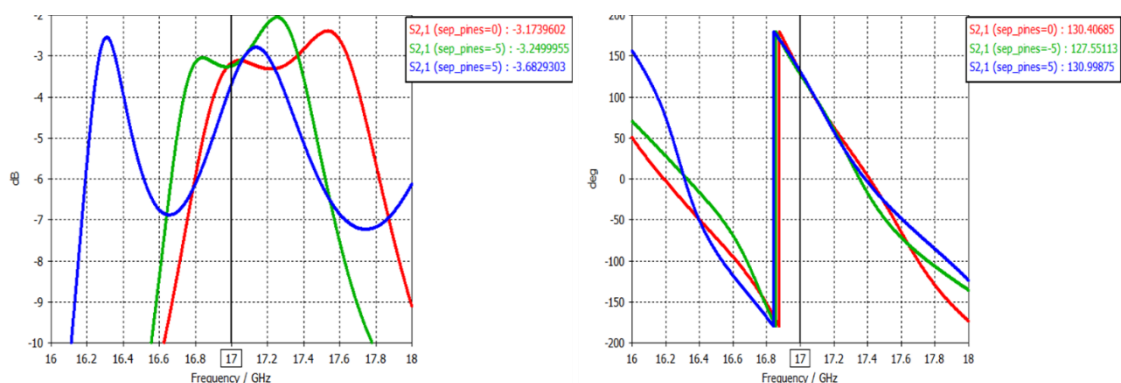


Figura B.10 Variación de los parámetros S21 tras variación de la distancia entre tornillos

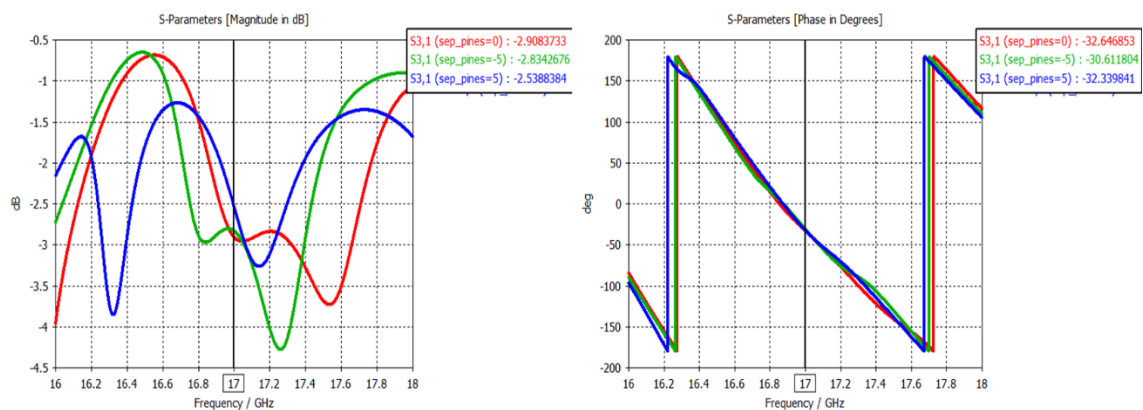


Figura B.11 Parámetros S31 tras separación de pares de tornillos

La separación entre los pares de pines si afecta a la adaptación, presentando peores anchos de bandas cuanto más cerca que, aunque, si bien es cierto que si se aleja demasiado puede suponer perder profundidad en la adaptación de ancho de banda. Siendo el caso de 21 mm de separación el que mejor ancho de banda a -10 mm presenta, pero el que peor adaptación presenta a la frecuencia central de trabajo.

Afecta poco a la fase de la transmisión.

Por lo tanto, a partir de ahora cogeremos la diferencia de 16 mm de separación que nos proporciona un ancho de banda de 900 MHz y un desfase respecto a sin tornillos de 157 grados positivos.

b. Divisor T alargado con dos pares de tornillos arriba y abajo

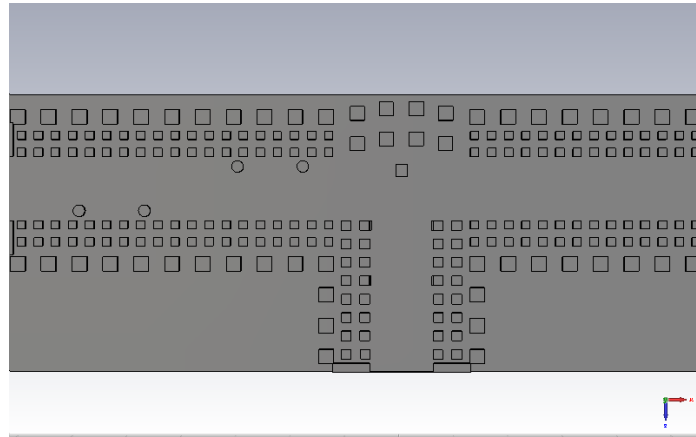


Figura B.12 Divisor T con 4 tornillos arriba contramapeados

Una vez estudiados ambos pines arriba, procedemos a estudiar a colocar ambos pines contra mapeados, es decir, el más próximo al centro de la guía se posiciona sobre la pared de pines superior, y el más alejado sobre la pared de pines inferior. El resto de parámetros continúan siendo los mismo que los anteriores.

Al igual que en los casos anteriores, procederemos a variar la distancia entre ellos y una vez establecida, a variar el bloque formado por ambos pares de pines.

i. Variando la distancia entre pines

En este estudio, se varía la distancia entre los pines, que originalmente era de unos 16 mm. La variable `sep_pines` se corresponde con la distancia entre cada par de tornillos. Para un valor de -5 se obtiene un valor de 21 mm de distancia entre pares mientras que para un valor de

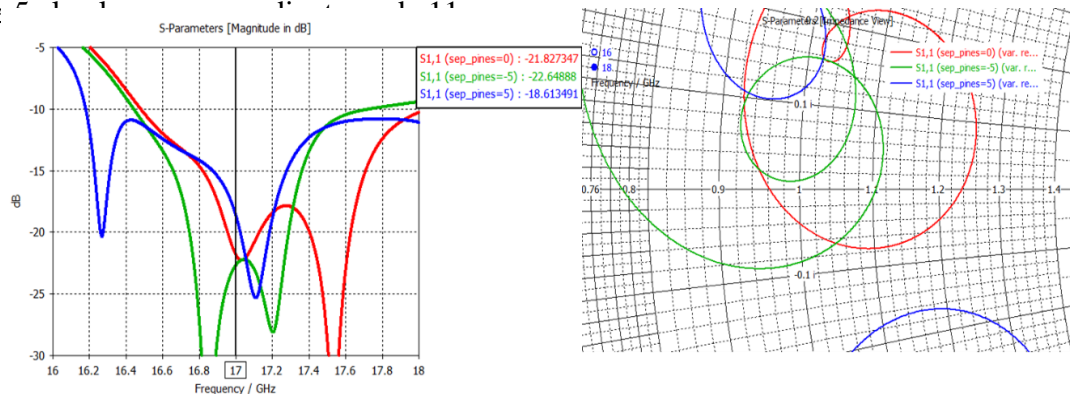


Figura B.13 Variación de la adaptación variando a separación entre tornillos

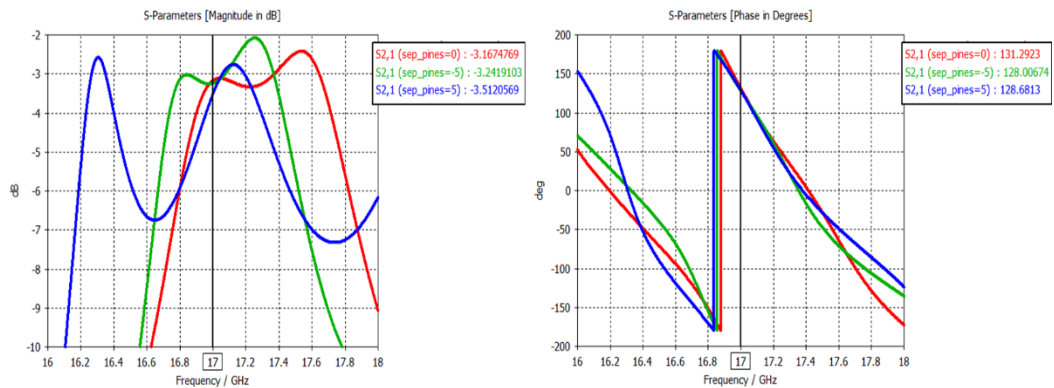


Figura B.14 Variación de los parámetros S21 variando separación entre tornillos

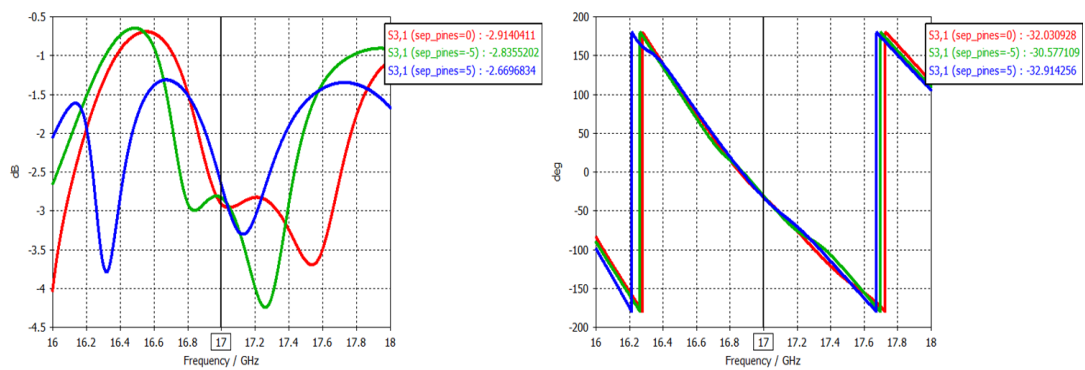
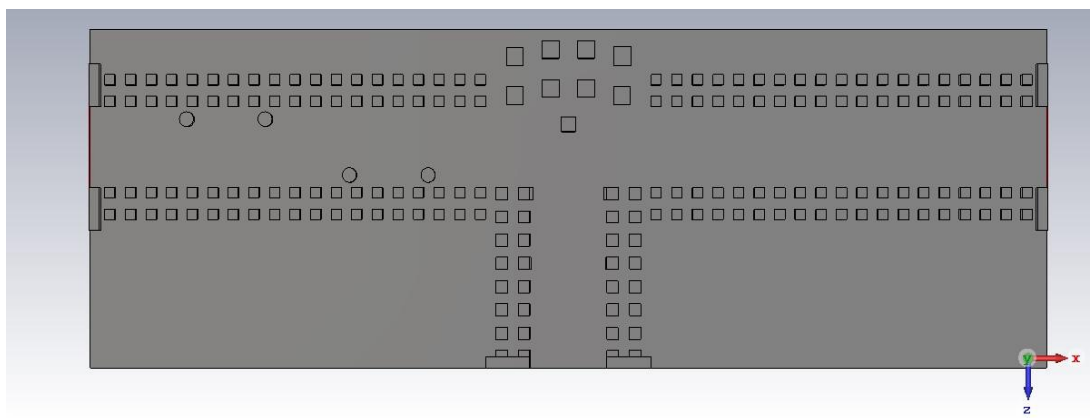


Figura B.15 Variación de los parámetros S21 variando separación entre tornillos

Como se observa en los resultados, se puede ver que cuando la disposición de los pines esta contra mapeada, a más proximidad entre los pines mejor resultado en cuanto al ancho de banda de la adaptación, aunque menor es la profundidad de esta.

En cuanto la fase de la transmisión, apenas se ven cambios significativos por la variación de la separación entre pares de tornillos.

c. Divisor T alargado con dos pares de tornillos abajo y arriba



Probaremos desplazando el bloque entero por la guía, observando si hay diferencias.

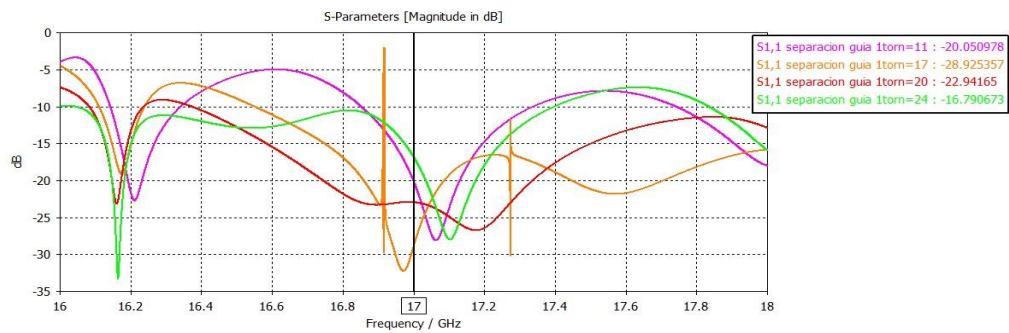


Figura B.16 Variación de la adaptación variando el bloque de tornillos

Al igual que en casos anteriores, el desplazamiento de los tornillos supone desplazar el rango de frecuencias de la adaptación a diferentes frecuencias centrales, obteniendo que a 20 mm como en el caso anterior, se consigue la mejor adaptación posible, dado que se forma una doble resonancia, que prácticamente mantiene el ancho de banda por debajo de los -10 dB.

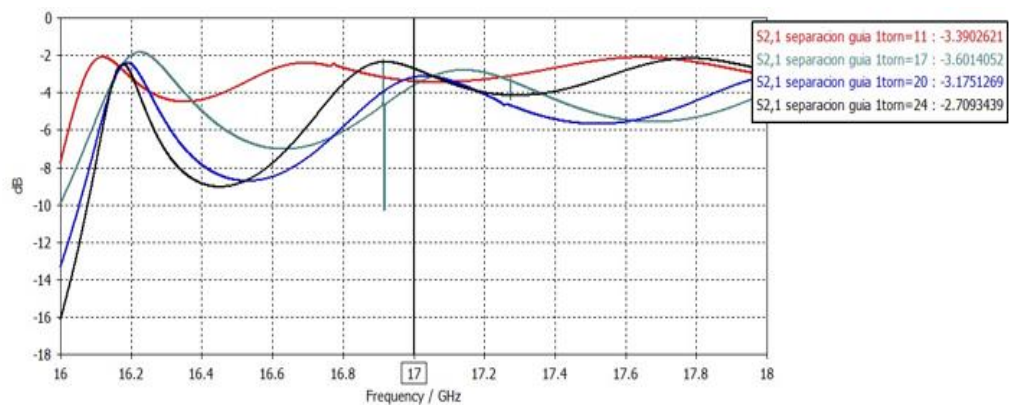


Figura B.17 Variación del parámetro S21 en amplitud variando el bloque de tornillos

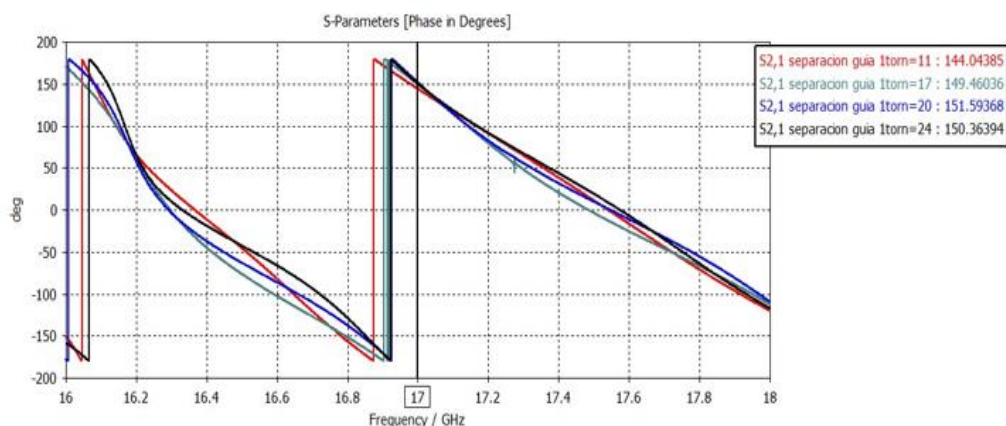


Figura B.18 Variación del parámetro S21 en fase variando el bloque de tornillos

Los transmisiones a ambos brazos, al igual que en los casos anteriores, varia ligeramente en cada iteración, entre el parámetro S21 y S31, tanto en modulo como en fase.

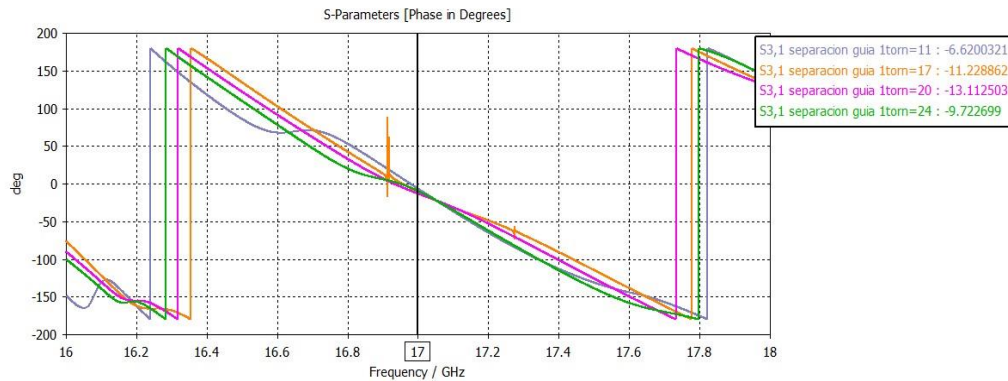


Figura B.19 Variación del parámetro S31 en amplitud variando el bloque de tornillos

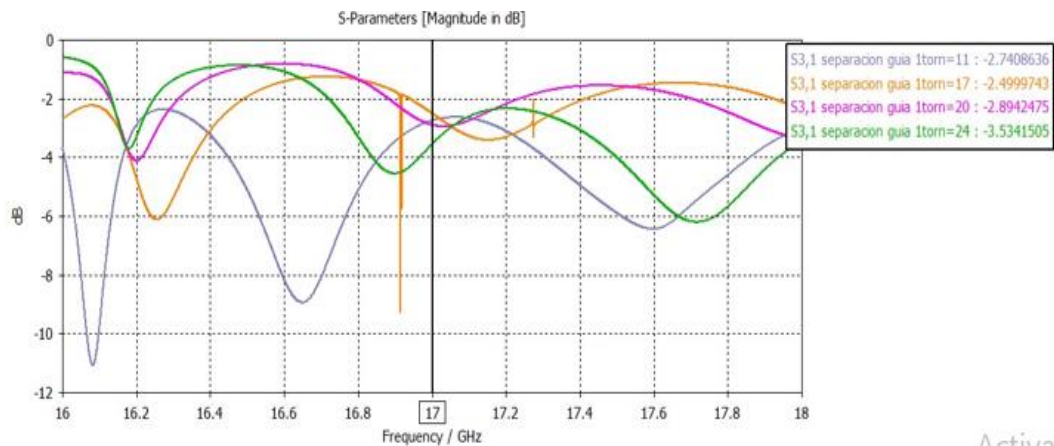


Figura B.20 Variación del parámetro S31 en fase variando el bloque de tornillos

Al igual que en los tornillos sin contramapear, el mejor ancho de banda y ajuste de fase se obtiene con la guía a 20 mm del centro.

Una vez diseñada el divisor en forma de T y una vez analizados los efectos de los tornillos sobre ella, procedemos a diseñar dos codos que nos permitan doblar los extremos de los divisores de manera que se puedan orientar respecto a z. De esta manera, se pueden conseguir múltiples aplicaciones, como desarrollar un sistema de alimentación con tecnología gap para un array de antenas.

Por lo tanto, se diseña el codo de manera independiente y procedemos a reproducir los resultados obtenidos del divisor con los codos ya establecidos.

Una vez creados los codos, se nos presenta una discontinuidad, y por lo tanto, un caso de estudio. Procedimos a colocar un par de tornillos sobre la guía sobre la parte superior y otro par en el otro extremo del divisor, sobre la pared formada por la salida del codo, es decir, orientada respecto a z. Una vez hecho esto, los desplazamos sobre la guía, y observamos, que cuando los tornillos están cerca del codo o de la discontinuidad de la guía, los desfases entre ambas puertos son mayores.

5. Divisor de salida

a. Divisor de salida con dos tornillos abajo

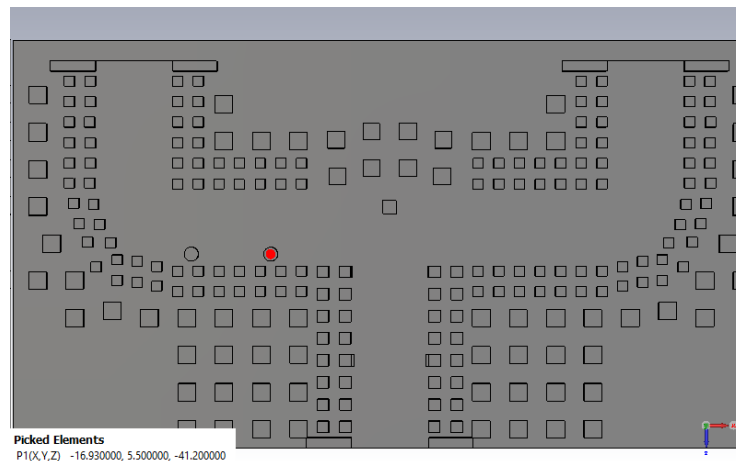


Figura B.21 Divisor de dos puertas con codo y tornillos

Siendo sus parametros S los siguientes:

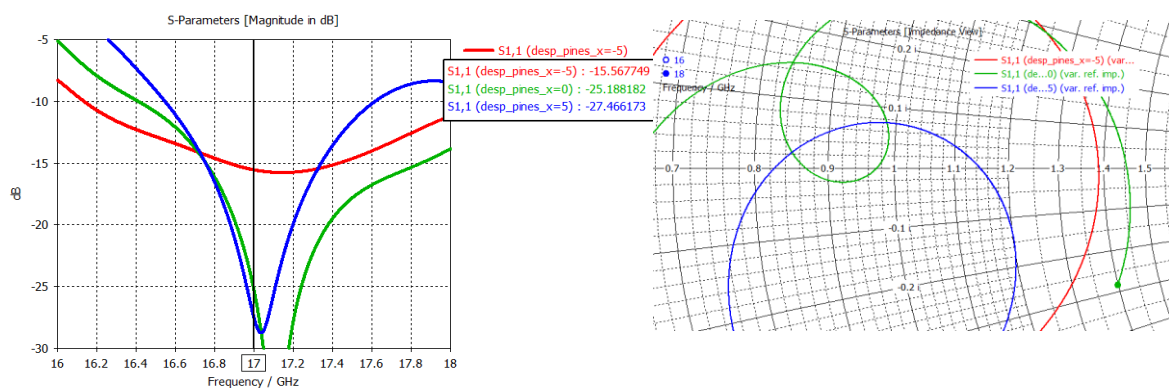


Figura B.22 Adaptación tras tornillos abajo

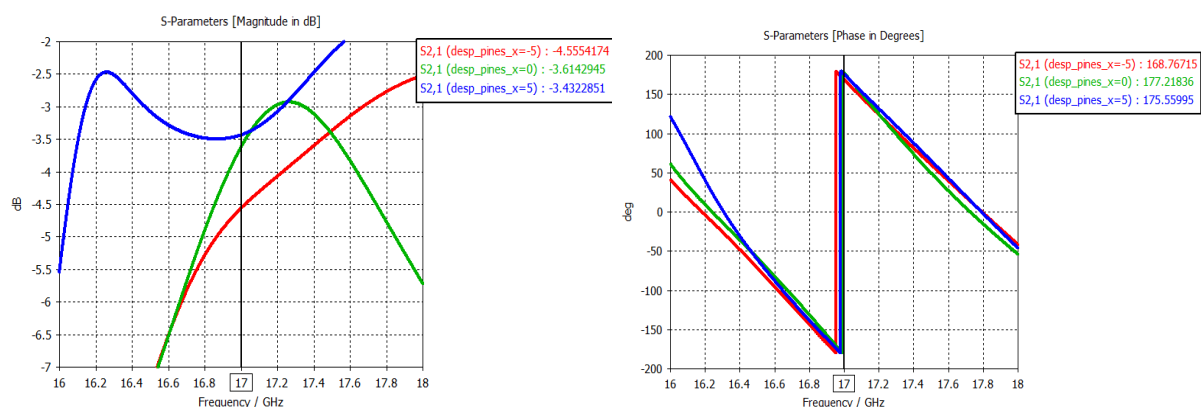


Figura B.23 Variación del parámetro S21 tras variación en x del par de tornillos

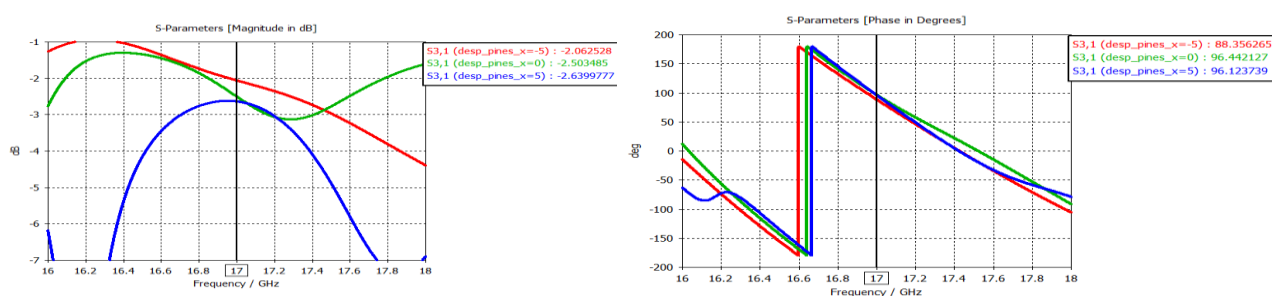


Figura B.24 Variación del parámetro S31 tras variación en x del par de tornillos

Observando los parametros obtenidos, se puede observar que a medida que los tornillos avanzan sobre el brazo de la guia y se acercan a la discontinuidad formada por el codo, el ancho de banda, si bien se mantiene por debajo de los -10 dB en la mayoría de banda, en la frecuencia de trabajo alcanza los -15 dB, a diferencia de las otras dos simulaciones donde a la frecuencia de trabajo los valores son inferiores a los -20 dB. Sin embargo, cuanto mas se acerca a la discontinuidad ofrecida por el centro de la guia, descende el ancho de banda.

En cuanto a la transmisión, los valores cercanos al codo presentan un desajuste de aproximadamente 2 dB entre la puerta 2 y la puerta 3.

Por ello, los valores que nos permiten obtener los resultados necesarios son los siguientes: Distancia entre pines 11.2875 mm, distancia entre la pared de pines y los tornillos de ajuste de fase son 0.7 mm, distancia entre pines 11 mm y el primer tornillo está a 16.93 mm del centro de la guía.

6. Divisor de Cuatro puertas

Una vez efectuada la estructura, era necesario probar si el ajuste de tornillos se comportaba de manera similar que en las anteriores estructuras gap que habíamos implementado. Además, dado que ahora teníamos otros dos divisores tras las salidas de un divisor, también teníamos que comprobar si el funcionamiento de los tornillos era similar cuando se encontraba en los brazos de los divisores posteriores.

El primer análisis se efectúa sobre uno de los brazos del primer divisor de la estructura (concretamente sobre el brazo izquierdo) en la parte superior de esta. Los resultados de los parámetros S son los siguientes:

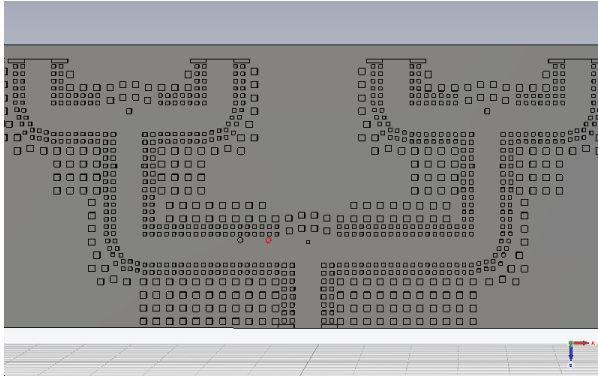


Figura B.25 Divisor de cuatro puertas

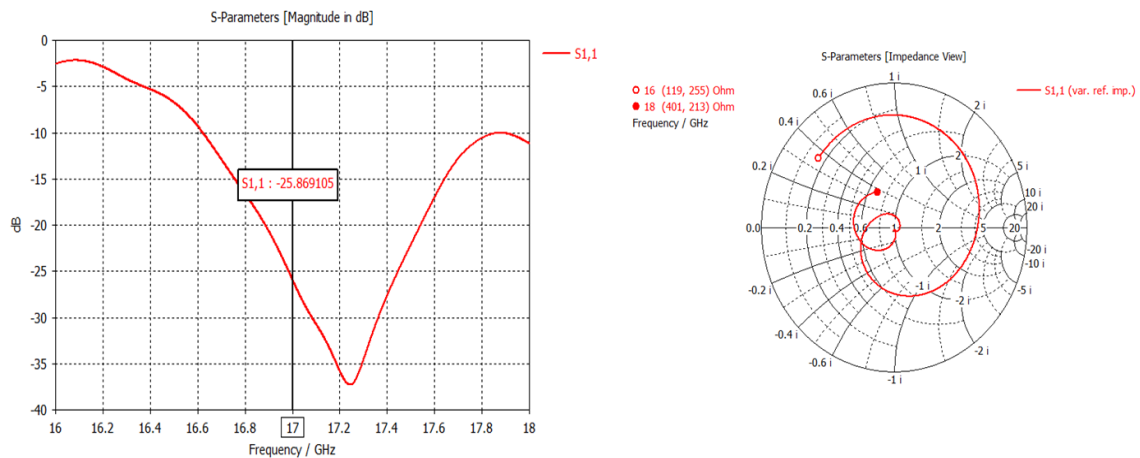


Figura B.26 Adaptación del divisor de cuatro puertas

La adaptación, tras los tornillos de ajuste de fase, se encuentra centrada en torno al centro de la carta de schmith, dándonos un ancho de banda por debajo de -10dBs de unos 1.6 GHz y por debajo de -20 dBs, de 400 MHz de ancho de banda.

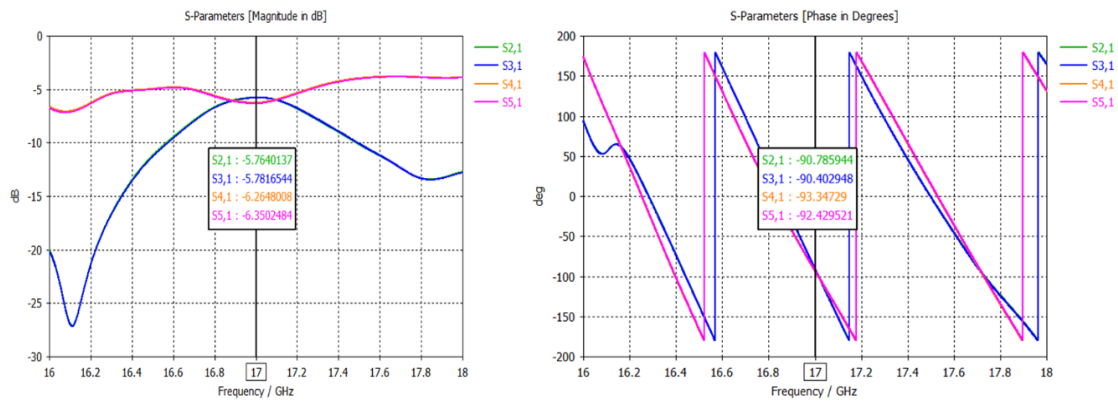


Figura B.27 Trasmisión de Divisor de cuatro puertas

a. Divisor de cuatro puertas con tornillos en el divisor de salida

En cuanto a las transmisiones, dado que solo introducimos los tornillos en una rama del primer divisor, los parámetros S21 y S31 son iguales entre si, al igual que los S41 y S51. Se produce un ligero desajuste con respecto al caso sin tornillos, aumentando a -5.75 y reduciéndose a -6.3.

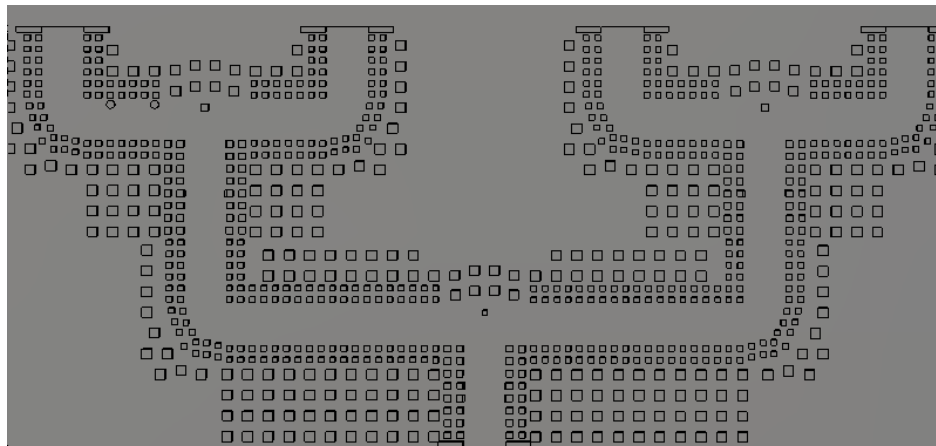


Figura B.28 Divisor de cuatro puertas con dos tornillos en el divisor de salida

Posteriormente, introducimos los tornillos de en uno de los extremos superiores de la guía, para observar si salen resultados similares a los anteriores, o si al contrario, el efecto del tramo de divisor anterior y la posición en la que se encuentra influye.

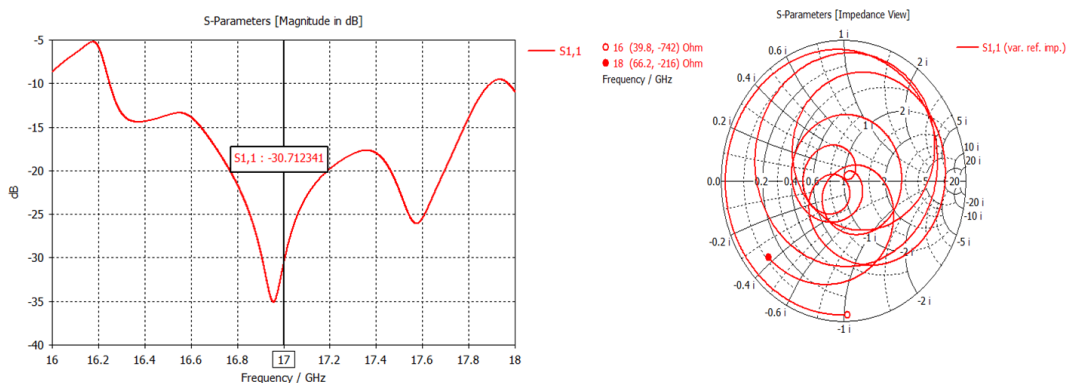


Figura B.29 Adaptación del Divisor de cuatro puertas con dos tornillos en el divisor de salida

En cuanto a la adaptación, es similar a las anteriores, aunque en carta de schmith presenta enroscamientos a lo largo de toda la carta. Obtenemos un ancho de banda de 1.4 GHz a -10 dBs, y 1.1 GHz a -15 dBs, con -30.71dBs a la frecuencia central de trabajo.

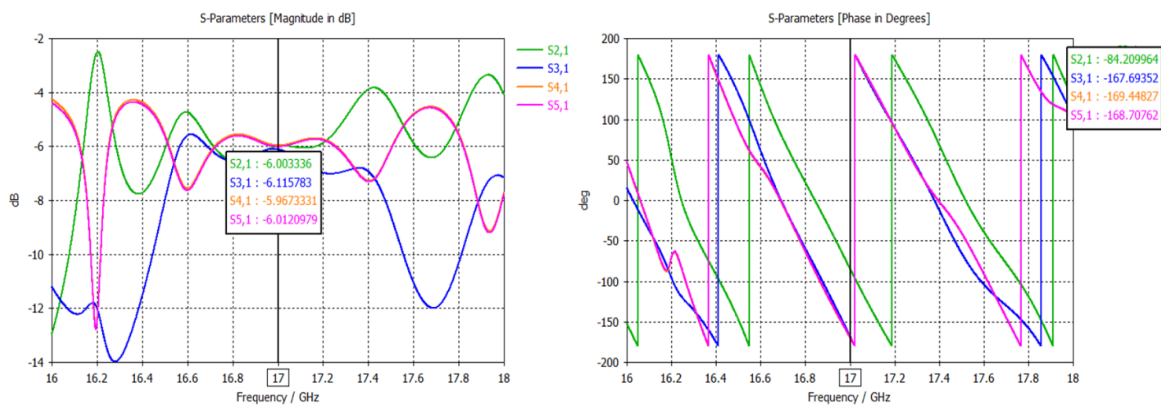


Figura B.30 Transmisión del Divisor de cuatro puertas con dos tornillos en el divisor de salida

En cuanto a la transmisión, en modulo se encuentran unas ligeras variaciones con respecto a los -6dBs originales la frecuencia de trabajo, pero son variaciones muy bajas. Sin embargo, para frecuencias más alejadas se encuentran grandes variaciones, llegando hasta lo -14 dBs para el S31 a 16.3 GHz.

En cuanto a la fase, dado que solo presentan tornillos el brazo correspondiente con el puerto 2, solo encontraremos desfase en esa puerta, por lo que observamos que esta se desfasa 83 grados positivos respecto a las anteriores, siendo estos, resultados muy similares a los de los 2 tornillos en uno de los brazos de la guía inferior.

